التفاعل بين
الأحياء الدقيقة

مكتبة
الحبر الإلكتروني
@bookkn
d110d

الأستاذ الدكتور

عبدالله بن مساعد بن خلف الفالح

أستاذ النبات والأحياء الدقيقة
كلية العلوم – جامعة الملك سعود

العبيكان
Obeikan

شركة العبيكان للتعليم، 1443هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر الفالح، عبدالله بن مساعد بن خلف

التفاعل بين الأحياء الدقيقة. / عبدالله بن مساعد بن خلف الفالح.- الرياض، 1443هـ

ردمك: 978-603-509-419-1

1 - علم الأحياء 2 - الأحياء الدقيقة أ. العنوان

ديوي 576 2881/ 1443

حقوق الطباعة محفوظة للناشر

الطبعة الأولى

1443هـ / 2022م

نشر وتوزيع Obeikan العبيكان

المملكة العربية السعودية-الرياض-طريق الملك فهد-مقابل برج المملكة

هاتف: 4808654 11 966+، فاكس: 4808095 11 966+

ص.ب: 67622 الرياض 11517

جميع الحقوق محفوظة. ولا يسمح بإعادة إصدار هذا الكتاب أو نقله في أي شكل أو واسطة، سواء أكانت إلكترونية أو ميكانيكية، بما في ذلك التصوير بالنسخ (فوتوكوبي)، أو التسجيل، أو التخزين والاسترجاع، دون إذن خطي من الناشر.

مكتبة الحبر الإلكتروني
مكتبة العرب الحصرية

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمـــــــة
Introduction

بسم الله والحمد لله والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين نبينا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين... أما بعد:

فقد أعانني الله سبحانه وتعالى، فألفت عددًا من الكتب في علم النبات والأحياء الدقيقة والبيئة النباتية، ما حدا بمعارفي وزملائي وطلابي إلى التلميح بأهمية تأليف كتاب عن تخصصي الدقيق ألا وهو (التفاعل بين الأحياء الدقيقة) الذي تفتقر إليه المكتبة العربية، ويحتاج إليه طلاب الدراسات العليا. والحقيقة أن هناك كتابات باللغة العربية حول هذا الموضوع، ولكنها في الواقع موضوعات متفرقة، ويشار إليها بإيجاز مقتضب، فما ملكت أمام إصرارهم إلا أن عقدت العزم، وأعددت العدة لتأليف كتاب عن التفاعل بين الأحياء الدقيقة Microbial interactions وها هو يخرج ويرى النور بتوفيق من الله وعون

من الباري سبحانه وتعالى.

إن هذا الكتاب يعرض مقدمة في فرع من فروع علم الأحياء الدقيقة الواسع ألا وهو التفاعل بين الأحياء الدقيقة، ولقد تمكنت ولله الحمد من تدريس هذا العلم (الفيروسات، والبكتيريا، والفطريات، والطحالب) خلال عقود متتالية من الزمن، وقد أكسبتني هذه الممارسة لعشرات السنين خبرة واسعة واطلاعًا كبيرًا على ما ينشر في أنحاء العالم من أبحاث ومقالات ودراسات في دوريات متخصصة وكتب في فروع هذا العلم. ونظرًا لقلة المعلومات في كثير من مؤلفات علم الأحياء الدقيقة باللغة العربية، وعلى الرغم من أنه يُدرَّس باللغة العربية في كليات المملكة العربية السعودية وجامعاتها، وفي كثير من جامعات العالم العربي؛ لذا فقد عمدت في أثناء إعداد المادة العلمية لهذا الكتاب إلى الاستعانة بأمهات المصادر العلمية باللغة الإنجليزية؛ لتقديمها لأبنائنا الطلاب والطالبات بصورة تساعدهم على الفهم، وتحسين تحصيلهم الدراسي في بيئة الأحياء الدقيقة.

الهدف من هذا الكتاب هو إعطاء مقدمة تعريفية عن بيئة الأحياء الدقيقة والمواطن البيئية الطبيعية والنظام البيئي ودور الأحياء الدقيقة فيه، وتدعيم ذلك بالأمثلة والصور التوضيحية قدر الإمكان، مع الحرص على تقديم المادة العلمية للطلاب والطالبات بأسلوب شائق وبطريقة جذابة تعينهم على زيادة تحصيلهم العلمي ورفع كفاءتهم.

ومما لا شك فيه أن كل فصل من فصول هذا الكتاب يمكن أن يُؤلّف فيه عدد كبير من الكتب المتخصصة؛ لذا كان لزامًا علي الاختصار قدر المستطاع بما لا يكون مخلًّا بالمادة العلمية، وهذا ما أحدث أمامي عقبة أخرى تكمن في جمع شتات هذه العلوم وتقديمها للطالب في ثوب قشيب وحلة جميلة جذابة مدعمة بأحدث الأشكال التوضيحية والصور الملونة.

يحتوي هذا الكتاب على عشرة فصول، وكل فصل من الفصول مقسم إلى عدد من العناوين التي تغطي الموضوعات الرئيسة في هذا المجال.

يتضمن الفصل الأول نبذة عن تركيب الأحياء الدقيقة مع مقارنة بين الخلايا حقيقية النواة والخلايا بدائية النواة وخصائص كلٍّ منهما، واستعراض طرق تنمية الكائنات الحية الدقيقة في مزارع الدفعات وفي مزارع مستمرة، واحتياجات النمو الميكروبي.

أما الفصل الثاني فيعالج الأحياء الدقيقة في بيئاتها الطبيعية، مع إعطاء فكرة عن انتشارها في الهواء والماء والتربة بوصفها بيئات طبيعية.

أما الفصل الثالث فإنه يتحدث عن الأحياء الدقيقة في النظام البيئي، مع التفصيل قليلًا في مجتمعاتها في النظام البيئي، وفي نهاية هذا الفصل كان الشرح عن تقدير الأعداد والكتلة الحيوية لها.

وخُصِّص الفصل الرابع لإعطاء نبذة عن النظام البيئي ومكوناته الحية وغير الحية والتفاعل فيما بينهما، ثم العوامل البيئية وتأثيرها في نمو الأحياء الدقيقة والغلاف الجوي والبيئة المائية والتربة.

وتناول الفصل الخامس موضوع التفاعلات البيئية بين الأحياء الدقيقة، وشمل ذلك التفاعلات بين جماعات الكائنات الحية الدقيقة المختلفة والتفاعلات بين الأحياءالدقيقة والنباتات.

بينما تحدث الفصل السادس عن التفاعلات بين الأحياء الدقيقة والنبات.

وجاء الفصل السابع ليختص بالأحياء الدقيقة في المحيط الجذري، وشمل بكتيريا المحيط الجذري والفطريات الجذرية وتقسيمها ومنحنى الإصابة وعلاقة الفطر بالنبات والتغذية المعدنية.

أما الفصل الثامن فتحدث عن دورات المعادن والماء في الطبيعة، ودور الأحياء الدقيقة في تحولات المعادن في التربة وزيادة خصوبتها.

والفصل التاسع كان للحديث عن الأشنات وتركيبها وتنظيم المكون الطحلبي والمكون الفطري وتكاثرها ووظائف الأعضاء والعوامل المؤثرة في نموها ثم تأثير الملوثات في الأشنات، وينتهي الفصل باستعراض الأهمية الاقتصادية للأشنات واستخداماتها.

وأتى الفصل العاشر والأخير ليتحدث عن التطبيقات الحديثة للتفاعل بين الأحياء الدقيقة، وشمل أنماط التفاعلات والتفاعلات الفريدة للأحياء الدقيقة وتنظيمها، ثم التنظيم الجزيئي والجوانب

التطبيقية والأهمية البيئية لتفاعلات الأحياء الدقيقة.

أعلم علم اليقين أن ما في هذا الكتاب، وما جمع بين دفتيه من حقائق علمية ومفاهيم أساسية تظل جهدًا بشريًّا يعتريه النقص، ويحتاج إلى تطوير وتقويم مستمرين؛ لذا أقدم هذا الكتاب وكلي أمل ورجاء من الإخوة الزملاء؛ أساتذة وطلابًا وطالبات وجميع المتخصصين في بيئة الأحياء الدقيقة ألا يبخلوا علي بآرائهم ومقترحاتهم حول تطوير هذا الكتاب وتنقيحه، وسوف أبذل قصارى جهدي لعلي أتمكن من تنفيذ ما يمكن تنفيذه منها في الطبعات القادمة إن شاء الله.

وفي الختام ما وجدتم في هذا الكتاب من نقص وخلل وزلل وخطأ فهو من نفسي ومن الشيطان، وما كان فيه من علم وفائدة ونفع فهو من الله، وأتى بعد سداده وتوفيقه.

وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين، وصلى الله وسلم على نبينا محمد الأمين المبعوث رحمة للعالمين، وعلى آله وصحبه أجمعين.

المؤلف

أ.د. عبدالله بن مساعد بن خلف الفالح

ربيع الاول 1443 هـ، الموافق أكتوبر 2021 م

الفصل الأول

تركيب الأحياء الدقيقة ونموها وتغذيتها

Microbial structure, growth and nutrition

- ◀ أولًا: الأحياء الدقيقة ذات النواة الحقيقية.
- ◀ ثانيًا: الأحياء الدقيقة ذات النواة البدائية.
- ◀ ثالثًا: نمو الأحياء الدقيقة.
- ◀ رابعًا: تغذية الأحياء الدقيقة.

الفصل الأول

تركيب الأحياء الدقيقة ونموها وتغذيتها

Microbial structure, growth and nutrition

كانت دراسة الأحياء الدقيقة في الماضي حتى منتصف القرن العشرين مقتصرة على الشكل الظاهري Morphological study فقط؛ وذلك لضعف الإمكانات وعدم تمكن الأجهزة والأدوات المتاحة من إعطاء تفاصيل أكثر، ثم شهد منتصف القرن العشرين الميلادي ظهور المجهر الإلكتروني الذي يستطيع تكبير الأشياء آلاف المرات، فتم توظيف المجهر الإلكتروني Electronic microscope في مجال علم الأحياء الدقيقة، وتوصل العلماء من خلاله إلى اكتشافات مهمة أدت إلى تغييرات كبيرة وجوهرية في حياة الإنسان والصناعات وعلاج الأمراض التي تصيبه، وتتلف المحاصيل الزراعية.

وأوضحت الدراسات أن الكائنات الحية عمومًا يمكن تقسيمها إلى مجموعتين أساسيتين بناءً على تركيبها الخلوي، فالخلية الأكثر تعقيدًا هي الخلية ذات النواة الحقيقية Eucaryotes وهي وحدة تركيب جميع الكائنات الحية ذات التركيب الخلوي (النباتات الراقية والطحالب والفطريات والحيوانات الراقية والبروتوزوا، وبحسب تصنيف وايتكر 1969م تتمثل في مملكة البروتستا، والمملكة النباتية، ومملكة الفطريات، والمملكة الحيوانية. أما الخلية الأقل تعقيدًا فهي الخلية ذات النواة البدائية Procaryotes والكائنات الحية ذات النواة البدائية تشمل البكتيريا Bacteria والبكتيريا الزرقاء (السيانو بكتيريا) Cyanobacter أو ما كانت تعرف بالبكتيريا الخضراء المزرقة Blue green bacteria أو الطحالب الخضراء المزرقة (Bergey 1984).

فتوالت جهود العلماء والباحثين مستغلين التطور الهائل في طرق ووسائل فحص الأحياء الدقيقة وتحديدًا وتطبيقات المجهر الإلكتروني، وأدى ذلك إلى ثورة علمية كبيرة في رصد ودراسة التفاصيل الدقيقة لتراكيب وخصائص الكائنات الحية الدقيقة. ومع مرور الوقت نلاحظ أن اكتشافات العلماء المتلاحقة رسخت مفهوم الفصل بين الأحياء ذات النواة الحقيقية Eucaryotic Organisms والأحياء ذات النواة البدائية Procaryotic Organisms، بل أصبحت خاصية وجود أو عدم وجود نواة حقيقية من أكثر الصفات المحددة والمهمة في الفصل بين الكائنات الحية وجعلهما في مجموعتين مختلفتين تمامًا كل الاختلاف في الوظائف والتركيب والتصنيف.

مقارنة بين الكائنات حقيقية النواة وبدائية النواة

لقد ساعدت الدراسة الخلوية بالمجهر الإلكتروني على توضيح التركيب البنائي الدقيق لخلايا الكائنات الحية، وهذا ما أدى إلى تغيير كبير في فهمنا ونظرتنا إلى هذه الكائنات الحية المتنوعة في

الشكل والتركيب والحجم، فالأحياء الدقيقة ذات النواة الحقيقية Eucaryotic Organisms هي الأكثر تطورًا، وتوصف خلاياها بأنها حقيقية النواة، وتكون فيها النواة ذات شكل محدد ومحاطة بغشاء نووي، بينما الأحياء ذات النواة البدائية Procaryotic Organisms فهي أقل تطورًا، وخلاياها تكون غير تامة النواة، وهكذا فلا يوجد غشاء نووي، ويشكل هذا النوع من الخلايا وحدة البناء الأساسية في البكتيريا والبكتيريا الزرقاء أو ما يعرف بالسيانو بكتيريا، ويضع علماء التصنيف هذه المجموعة من الكائنات الحية في مملكة مستقلة أسموها مملكة البدائيات Monera.

وفي الماضي كان عدم وضوح النواة المحددة في بدائيات النواة مدعاة للاعتقاد بعدم احتوائها على نواة، إلى أن تبين فيما بعد أن خلايا هذه الأحياء تحتوي على منطقة نووية، ولكنها غير محددة بغشاء، بل تنتشر في سيتوبلازم الخلية.

ويمكن إجراء مقارنة بين تركيب خلايا الأحياء الدقيقة ذات النواة الحقيقية والأحياء الدقيقة ذات النواة البدائية وإعطاء عرض موجز لأهم الصفات المميزة لكل مجموعة بحسب الجدول (1-1) الآتي:

الجدول (1-1): مقارنة بين تركيب خلايا حقيقية النواة وبدائية النواة.

الصفة **Character**	بدائية النواة **Procaryotes**	حقيقية النواة **Eucaryotes**
الأحياء التي تمثلها	البكتيريا، السيانو بكتيريا.	النباتات والطحالب والفطريات والحيوانات الراقية والبروتوزوا.
أبعاد الكائن	1-2 × 1-4 ميكرون أو أقل.	أكثر من 5 ميكرونات في عرضها أو قطرها.
الجدار الخلوي	تدخل في تركيبه الببتيدات الجليكونية Peptidoglycans (سكريات أمينية) ومواد دهنية، وحمض الميوراميك Muramic.	لا يحتوي على السكريات الأمينية، ولا المواد الدهنية، ولا على حمض الميوراميك Muramic acid.
الأغشية السيتوبلازمية	لا تحتوي على ستيرولات Sterols وقد تحتوي على جزء من الجملة التنفسية	تحتوي على ستيرولات Sterols ولا تقوم بالتنفس ولا البناء الضوئي

	وأحيانًا على جهاز البناء الضوئي.	Photosynthesis.
السيتوبلازم: طبيعتها محتوياتها	لا يوجد انسياب سيتوبلازمي Cytoplasmic streaming.	تمتاز خلاياها بوجود انسياب سيتوبلازمي Cytoplasmic streaming.
	قد تحتوي على فجوات غازية Gas-vacuoles وميزوزومات Mesosomes.	لا تحتوي على فجوات غازية Gas-vacuoles ولا ميزوزومات Mesosomes.
	لا توجد شبكة إندوبلازمية Endoplasmic reticulum.	توجد شبكة إندوبلازمية Endoplasmic reticulum.
	لا تحتوي على الميتوكوندريا، ولا على البلاستيدات الخضراء، ولا أجسام جولجي Golgi bodies.	تحتوي على الميتوكوندريا، Mitochondria وعلى أجسام جولجي، وقد تحتوي على البلاستيدات الخضراء.
الجملة الوراثية: وجودها بنية النواة	في المادة النووية المبعثرة، والأجسام الكروماتينية Chromatin bodies.	توجد في النواة Nucleus، وفي الميتوكوندريا، وفي البلاستيدات الخضراء Chloroplasts.
	لا يوجد غشاء نووي ولا نويات Nucleolus.	محاطة بغشاء نووي، وتحتوي على نويات.
	يوجد كروموسوم واحد Chromosome، يتركب من أحماض نووية فقط.	يوجد أكثر من كروموسوم، تتركب من أحماض نووية وبروتين مرافق (هيستونات).
	لا يوجد انقسام ميتوزي Mitosis في خلاياها.	يوجد انقسام ميتوزي (خيطي).

وسوف أتناول كلًّا من الأحياء الدقيقة ذات النواة الحقيقية والأحياء الدقيقة ذات النواة البدائية بشيء من التفصيل؛ للمقارنة بينهما وتوضيح ما تتميز به كل مجموعة على حدة، وما يميزها عن المجموعة الأخرى كما يلي:

أولًا: الأحياء الدقيقة ذات النواة الحقيقية Eucaryotic Microorganisms

تُجمع الأحياء الدقيقة حقيقية النواة في مملكة واحدة هي مملكة البروتستا Protista وتشمل ثلاث مجموعات رئيسة متميزة، وهي الطحالب Algae، والبروتوزوا Protozoa، والفطريات Fungi، ومملكة البروتستا هي مجموعة من الأحياء الدقيقة تحتوي على أنوية حقيقية تشبه تلك الموجودة في النباتات الراقية والحيوانات، ومما يميز النواة الحقيقية عن النواة غير الحقيقية وجود الغشاء النووي Nuclear membrane. فيلاحظ أن هناك غشاء نوويًّا واضحًا يحيط بالنواة الحقيقية في غير مراحل الانقسام المختلفة، بينما تفتقر الأنوية غير الحقيقية إلى مثل هذا الغشاء النووي، وتمتاز الأحياء الدقيقة حقيقية النواة بوجود عضيات متخصصة للقيام بوظائف معينة داخل الخلية مثل البلاستيدات الخضراء، والميتوكوندريا، والشبكة الإندوبلازمية، وأجسام جولجي، وغيرها.

ومن الجدير بالذكر أن انقسام الخلايا حقيقية النواة والتكاثر الجنسي فيها يكون أكثر تعقيدًا مما يحدث في الخلايا ذات النواة البدائية، علمًا أن النواة تحتوي على الصفات الوراثية للكائن الحي، وهي المسؤولة عن نقلها من جيل إلى آخر.

الصفات العامة لذوات النواة الحقيقية

من خلال استعراض الأنواع المتنوعة من الأحياء الدقيقة حقيقية النواة نجد أنها تتشابه في عدد من الصفات المهمة، ويمكن التطرق لأبرز هذه الخصائص أو الصفات المشتركة في الكائنات الحية حقيقية النواة كما يلي:

- **وحدة الغشاء Membrane unit**

عند فحص خلايا الأحياء الدقيقة حقيقية النواة بواسطة المجهر الإلكتروني نجد أنها تكون محاطة بغشاء خلوي Cellular membrane مكون من ثلاث طبقات سمكه يصل إلى 8 نانوميترات، ويسمى أحيانًا الغشاء السيتوبلازمي Cytoplasmic membrane أو الغشاء البلازمي Plasmic membrane. وتسمى الأغشية بهذا التركيب وحدة الغشاء، وعلى الرغم من أن هناك تشابهًا كبيرًا

في الأغشية الخلوية بين الأحياء الدقيقة حقيقية النواة وبدائية النواة، ولكن يوجد أوجه تباين في التركيب البنائي مثل اختلاف نوعية الفوسفوليبيدات Phospholipids والبروتينات Proteins، إضافة إلى الستيرولات Sterols ذات الصلابة Rigidity التي تنفرد بها أغشية الأحياء الدقيقة حقيقية النواة؛ لذا تكون الأغشية الخلوية للأحياء الدقيقة حقيقية النواة أكثر صلابة منها في بدائية النواة.

- **الشبكة الإندوبلازمية Endoplasmic reticulum**

تتميز الأحياء الدقيقة حقيقية النواة بوجود الشبكة الإندوبلازمية التي تغيب تمامًا عن الأحياء الدقيقة بدائية النواة، والشبكة الإندوبلازمية ليست عضية داخلة محددة في الخلية، بل هي عبارة عن خطوط متعددة من الغشاء الداخلي وظيفتها بناء البروتينات في الخلية، فهي شبكة غير منتظمة من قنوات رفيعة متعددة تنتشر في السيتوبلازم، وتربط بين النواة من جهة وبين الريبوسومات من جهة أخرى. علمًا أن جزءًا من الشبكة الإندوبلازمية يحيط بالنواة مكونًا الغشاء النووي، والأجزاء الأخرى تنتشر في السيتوبلازم، وتعرف باسم الشبكة الإندوبلازمية الخشنة Rough endoplasmic reticulum، وفيها يكون سطح الغشاء مغطى بالريبوسومات المسؤولة عن بناء بروتينات الخلية المتنوعة من خلال المعلومات الوراثية الموجودة على الحمض النووي mRNA الذي يتكون في النواة، ثم يمر من خلال قنوات الشبكة الإندوبلازمية إلى الريبوسومات.

- أجسام جولجي Golgi bodies

هي تركيبات محددة ذات غشاء، وهي تنفرد بها خلايا الأحياء الدقيقة حقيقية النواة، حيث تغيب تمامًا عن خلايا الأحياء الدقيقة بدائية النواة، والوظيفة الأساسية لأجسام جولجي هي إفراز الأنزيمات والجزيئات الكبيرة الأخرى، فهي عضيات داخلية غشائية تتكون من عدد من الأكياس والأوعية المفلطحة مختلفة الأحجام ومحاطة بوحدة الغشاء، وتقوم أجسام جولجي بوظيفة إخراجية مهمة تسمى Exocytosis تلاحظ لدى بعض الكائنات الحية، حيث تعبأ الفضلات فيها، ثم تتحرك أجسام جولجي إلى غشاء الخلية، فتلتصق به، ثم تنفجر. وتقوم أجسام جولجي بنقل المواد البروتينية من مكان إلى آخر، حيث تعبأ المواد البروتينية المتكونة عند الشبكة الإندوبلازمية في هذه الأجسام التي تقوم بنقلها داخل الخلية.

- **البلاستيدات الخضراء والميتوكوندريا Mitochondria& Chloroplasts**

يقتصر وجود كل من البلاستيدات الخضراء والميتوكوندريا في خلايا الأحياء الدقيقة حقيقية النواة، بينما تخلو منهما تمامًا خلايا الأحياء الدقيقة بدائية النواة. ويتم في هاتين العضيتين الغشائيتين Membrane-bound organelles (البلاستيدات الخضراء والميتوكوندريا) أنظمة التمثيل الضوئي وتوليد الطاقة. وكلاهما يحتويان على نظم غشائية داخلية خاصة، حيث تنفرد البلاستيدات الخضراء بالثيلاكويد Thylakoid وهو نظام غشائي مكون من ثنيات كثيرة تحتوي بين طياتها

على صبغيات التمثيل الضوئي Photosynthesis pigments ونظام انتقال الإلكترونات Electronic transport system ومراكز التفاعل الضوئي Photochemical reaction centers إضافة إلى عدد من الأنزيمات المسؤولة عن تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية Chemical bond energy، ويحتوي الوسط الداخلي للبلاستيات الخضراء على مجموعة أخرى من الأنزيمات تعمل على تحويل غاز ثاني أكسيد الكربون إلى سكريات، بينما نجد أن النظام الغشائي للميتوكوندريا يسمى كريستا Cristae وهو عبارة عن ثنيات متعددة تحتوي بين طياتها على نظام انتقال الإلكترونات التنفسي Electronic transport system والأنزيمات الخاصة به، فالبنية الداخلية للميتوكوندريا توضح أنها مقسمة عرضيًّا بسلسلة من الأغشية الدقيقة التي تنشأ من الغلاف الداخلي المحيط بها، وتُعدّ هذه الأغشية الموقع الذي توجد فيه الأنزيمات المسؤولة عن نقل الإلكترونات من المادة المتأكسدة إلى الأوكسجين، إضافة إلى الأنزيمات المسؤولة عن أكسدة الكربوهيدرات، وتحرر غاز ثاني أكسيد الكربون.

- **المواد الوراثية Nuclear genome**

في خلايا الأحياء الدقيقة ذات النواة البدائية توجد المواد الوراثية في المادة النووية المبعثرة، والأجسام الكروماتينية Chromatin bodies حيث لا يوجد غشاء نووي ولا نويات Nucleolus وبها كروموسوم واحد Chromosome، يتركب من أحماض نووية فقط، بينما توجد الجملة الوراثية في النواة Nucleus لدى خلايا الأحياء الدقيقة ذات النواة الحقيقية، وتكون موزعة على عدد محدود من التركيبات المميزة المعروفة باسم الكروموسومات، والنواة محاطة بغشاء نووي Nuclear membrane يحتوي على عدد كبير من الثقوب، وتحتوي النواة على نويات Nucleolus، وتمتاز بوجود أكثر من كروموسوم، وكل كروموسوم ذو تركيب خيطي يتراوح طوله بين 20-30 نانوميترًا، يتركب من الحمض النووي (Deoxyribonucleic Acid (DNA وبروتينات مرافقة قاعدية تسمى هيستونات Histones وبروتينات غير هيستونية تقوم بدور خاص في تنظيم نشاط المورثات Genes المختلفة، ويوجد جزء من المواد الوراثية في خلايا الأحياء الدقيقة ذات النواة الحقيقية في كل من الميتوكوندريا وفي البلاستيدات الخضراء Chloroplasts، ولا يوجد انقسام غير مباشر ميتوزي Mitosis في الخلايا بدائية النواة، بينما يوجد انقسام ميتوزي (خيطي) في الخلايا حقيقية النواة، إضافة إلى الانقسام الاختزالي ميوزي Meiosis (Reduction division). وتؤدي عملية الانقسام الاختزالي إلى اختزال عدد الكروموسومات في الخلايا الناتجة بعد الانقسام إلى النصف، وهي التي تُكوِّن الجاميطات Gametes أو الأمشاج Germ cells، بينما نجد أن عملية الانقسام غير المباشر تؤدي إلى مضاعفة عدد الكروموسومات في بداية الانقسام، ثم تنقسم لتعطي العدد نفسه من الكروموسومات قبل الانقسام، وينتج عن اندماج الأمشاج تكون اللاقحة Zygote ثنائية المجموعة الصبغية (N2)، ومن الجدير بالذكر أن اندماج الأمشاج يقترن باندماج

الأنوية في جميع الخلايا حقيقية النواة، ما ينتج عنه احتواء اللاقحة على مجموعتين من المواد الوراثية إحداهما من المشيج المذكر والأخرى من المشيج المؤنث.

- **نظام الأنابيب الدقيقة Microtubular system**

تكون الأنبوبة الدقيقة Microtubule على شكل أسطوانة دقيقة متناهية في الصغر ذات أطوال مختلفة وقطرها لا يتجاوز 30 نانوميترًا، وجدرها تتركب من وحدات بروتينية، فالأنابيب الدقيقة عنصر تركيبي مهم في الكائنات الحية حقيقية النواة، وتؤدي دورًا بارزًا ورئيسًا في تكوين وصيانة الشكل العام لبعض الخلايا في الكائنات الحية حقيقية النواة، وإن نظام الأنابيب الدقيقة يقوم بوظيفة أساسية في عملية الانقسام الخلوي تتمثل في تكوين شبكة المغزل التي يتم عليها الانقسام وعملية انتقال الكروموسومات إلى المراكز الطرفية في الخلية في أثناء عملية الانقسام.

بإضافة إلى ذلك، فإن نظام الأنابيب الدقيقة Microtubular system له دور مهم في تركيب وآلية عمل أجهزة الحركة لدى خلايا الأحياء الدقيقة حقيقية النواة من أسواط Flagella وأهداب Cilia، فقد بينت الصور المأخوذة بالمجهر الإلكتروني لقطاعات عرضية في أسواط وأهداب الخلايا حقيقية النواة أنها تحتوي على تسعة أزواج أنابيب دقيقة خارجية محيطة بزوج أنابيب في مركز السوط أو الهدب، ولوحظ أن الزوج المركزي من الأنابيب يتكون من قاعدة قرب سطح الخلية، وأما الأزواج التسعة المحيطة فهي تنشأ من جسم مركزي يسمى Centriole ويتكون أيضًا بدوره من تسعة أزواج من الأنابيب الدقيقة، ووُجد أنه في بعض خلايا الكائنات الحية حقيقية النواة يشترك الجسم المركزي في تكوين ما يعرف بالمغزل Spindle الذي يشترك في الانقسام غير المباشر ميتوزي Mitosis؛ وذلك لوجود هذه الأجسام المركزية قرب قطبي المغزل في أثناء عملية الانقسام الخلوي (النخال 1998م).

- **الحركة السيتوبلازمية Cytoplasmic streaming**

باستثناء وقت الانقسام الخلوي يُلاحَظ أن منطقة السيتوبلازم في خلايا الكائنات الحية حقيقية النواة تكون معزولة عن النواة ومحتوياتها بحكم وجود الغشاء النووي، وأثبت الفحص المجهري لعدد من الكائنات الحية الدقيقة حقيقية النواة أن السيتوبلازم في معظم هذه الكائنات يكون في حركة داخلية مستمرة نشطة تسمى Cytoplasmic streaming. وإن للحركة السيتوبلازمية دورًا مهمًّا وبارزًا في عدد من نشاطات الخلية في الكائنات الحية الدقيقة حقيقية النواة. ومن فوائد الحركة السيتوبلازمية الداخلية تحرك الكروموسومات في أثناء عملية الانقسام وتركيز عضية الميتوكوندريا في مواقع محددة في السيتوبلازم، إضافة إلى دورها في ترتيب البلاستيدات الخضراء وحركة الفجوات المنقبضة الإخراجية وأجسام جولجي ودورها في النقل الخلوي الداخلي.

ومن الجدير بالذكر أن هذه الحركة السيتوبلازمية لا تؤدي في الغالب إلى تحرك الكائن؛ لأن هذه الكائنات تملك جدارًا خلويًّا سليلوزيًّا صلبًا يفصل السيتوبلازم الداخلي عن الوسط الخارجي، فلا تتحول الحركة السيتوبلازمية إلى حركة فعلية تنقل الكائن الحي من مكان إلى آخر، ويستثنى من ذلك ما ليس له جدار خلوي مثل الأوليات والأميبا والفطريات اللزجة التي تؤدي فيها الحركة السيتوبلازمية إلى حركة خلاياها على سطح البيئات الصلبة. أما الدياتومات فعلى الرغم من أنها تملك جدارًا خلويًّا، فإن الحركة السيتوبلازمية فيها تساعد على حركتها، ويرجع ذلك إلى أن جدارها الخلوي غير مستمر، ولا يحيط إحاطة تامة بالكائن الحي.

ثانيًا: الأحياء الدقيقة ذات النواة البدائية Procaryotic Microorganisms

يضع علماء التصنيف هذه المجموعة من الكائنات الحية الدقيقة ذات النواة البدائية في مملكة مستقلة أطلق عليها اسم مملكة البدائيات (المونيرا) Monera تشمل البكتيريا Bacteria والبكتيريا الزرقاء Blue green bacteria، وهي أقل تطورًا من الكائنات الحية ذات النواة الحقيقية، وخلاياها تكون غير تامة النواة، وهكذا فلا يوجد غشاء نووي، ويشكل هذا النوع من الخلايا وحدة البناء الأساسية في البكتيريا والبكتيريا الزرقاء أو ما يعرف بالسيانو بكتيريا Cyanobacter.

في الماضي كان عدم وضوح النواة المحددة في بدائيات النواة مدعاة للاعتقاد بعدم احتوائها على نواة، إلى أن تبين فيما بعد أن خلايا هذه الأحياء تحتوي على منطقة نووية Nuclear region ولكنها غير محددة بغشاء نووي، بل تنتشر في سيتوبلازم الخلية، ومنطقة النواة تمتلئ بمنظومة من الليفات الدقيقة التي تتركب أساسًا من الحمض النووي DNA غير المنتظم في كروموسومات، والحقيقة أن هذا الفرق الجوهري بين الأحياء الدقيقة حقيقية النواة والأحياء الدقيقة بدائية النواة لم يتمكن العلماء من ملاحظته إلا في منصف القرن العشرين الميلادي؛ أي بعد اكتشاف المجهر الإلكتروني الذي تصل قوة تكبيره للأشياء إلى أكثر من 10 آلاف مرة.

وتمتاز الكائنات الحية الدقيقة ذات النواة البدائية بأن جدارها الخلوي تدخل في تركيبه الببتيدات الجليكونية Peptidoglycans (سكريات أمينية) ومواد دهنية، إضافة إلى حمض الميوراميك Muramic. أما الأغشية السيتوبلازمية فلا تحتوي على ستيرولات Sterols وقد تحتوي على جزء من الجملة التنفسية، وأحيانًا على جهاز البناء الضوئي، وإنه لم يلاحظ في خلاياها الحركة السيتوبلازمية الداخلية الدؤوبة أو ما يعرف بالانسياب السيتوبلازمي Cytoplasmic streaming الموجود في الخلايا حقيقية النواة، وعلى الرغم من خلو السيتوبلازم في خلايا بدائية النواة من أي عضيات دقيقة، فإن العمليات والوظائف الأيضية التي تقوم بها هذه العضيات تحدث في الغالب في خلايا بدائية النواة.

وتتحرك خلايا الأحياء الدقيقة، وخصوصًا بعض الأنواع البكتيرية والسيانو بكتيريا على الأسطح الصلبة بواسطة الحركة الانزلاقية Gliding movement وذلك لافتقارها إلى الحركة

السيتوبلازمية Cytoplasmic streaming المشهورة في حقيقية النواة. إضافة إلى الأسواط Flagella في الأوساط الصلبة، وعدد قليل من البكتيريا يتحرك بواسطة ما يسمى الخيط المحوري Axial Filament حيث تلتف حزم الألياف بشكل حلزوني حول الخلية البكتيرية المثبت في نهايتها هذه الحزم من الألياف.

قد تحتوي خلايا الأحياء الدقيقة بدائية النواة على فجوات غازية Gas-vacuoles وميزوزومات Mesosomes. لا توجد شبكة إندوبلازمية Endoplasmic reticulum في خلايا الكائنات الحية الدقيقة ذات النواة البدائية، ولا تحتوي على الميتوكوندريا، ولا على البلاستيدات الخضراء، ولا تحتوي على أجسام جولجي Golgi bodies. وتوجد الجملة الوراثية في الأحياء الدقيقة بدائية النواة في المادة النووية المبعثرة، والأجسام الكروماتينية Chromatin bodies. ولا يوجد غشاء نووي ولا نويات Nucleolus. ويوجد كروموسوم واحد Chromosome يحمل جميع الصفات الوراثية، يتركب من أحماض نووية فقط، حيث تترتب جميع الصبغيات Genes ترتيبًا خطيًّا في مجموعة ارتباط خطية Single linkage group، وتمتاز بعدم وجود أي صفات لها سيادة وراثية Dominance ما يؤدي إلى سرعة ظهور الطفرات Mutations عند حدوثها، ولا يحول دون التعبير عنها صفة السيادة، ولا يوجد انقسام مباشر ميتوزي Mitosis في خلاياها؛ فالانقسام النووي لا يشتمل على انقسامات مباشرة في خلايا الكائنات الحية ذات النواة البدائية، بل تنقسم منطقة النواة إلى وحدتين متماثلتين دون أن يطرأ أي تغيير على شكلها.

ويتم انتقال الصفات الوراثية Genetic transfer في خلايا الأحياء الدقيقة بدائية النواة بثلاث طرق أساسية، فهناك طريقة التزاوج الخلوي Cellular conjugation والانتقال Transformation والنقل Transduction. وجميعها تؤدي إلى الانتقال الجزئي للصبغيات، وما يتبعه من مراحل حتى يتم تكوين اللاقحة الجزئية Merozygote التي تحمل الصفات المشتركة، ففي الخلايا البكتيرية يكون الاندماج مؤقتًا Fusion في حالة التزاوج الخلوي من الخلية المعطية Donor إلى الخلية المستقبلة Recipient؛ أي لا يحدث اندماج كامل في هذا النوع من التزاوج، ثم يعود جزء صغير فقط من المجموعة الصبغية Genome إلى الخلية المعطية، وذلك قبل انفصال الخليتين عن بعضهما.

ثالثًا: نمو الأحياء الدقيقة Microbial growth

يُعدّ النمو Growth من أهم وأبرز الصفات والخصائص المميزة للكائنات الحية عن الجمادات، وظاهرة الحياة التي تتصف بها كل الكائنات الحية بما فيها الأحياء الدقيقة إنما تعكس مستوى معينًا من تنظيم التركيب الخلوي وأوجه النشاط الحيوي لمجموعة من المركبات (الجزيئات) الكيميائية التي يطلق عليها اسم (المادة الحية). وهكذا، فإن ظاهرة النمو تتمتع بها جميع الكائنات الحية بلا

استثناء، ويمكن ملاحظتها بأشكال وبطرق متنوعة تختلف باختلاف الكائن الحي وخصائصه التركيبية، وفي المقابل لا يمكن حدوث النمو في الكائنات غير الحية مثل الجمادات.

يقصد بالنمو تلك الزيادة في المادة الحية التي تترافق بزيادة في أعداد الخلايا نتيجة لانقسامها، ويكبر حجم الخلايا الناتجة عن هذا الانقسام، ويستمر النمو بشكل طردي وبمعدلات خاصة بكل مرحلة من مراحل حياة الكائن الحي، حتى يصل إلى مرحلة النضج أو البلوغ، وعندها يتكاثر؛ أي يعطي أفرادًا جديدة مشابهة لأصولها في الشكل والتركيب، وهناك نوعان من التكاثر لدى الأحياء الدقيقة: أحدهما يعرف بالتكاثر اللاجنسي Asexual reproduction، كانقسام الكائنات الحية وحيدة الخلية إلى قسمين يشكل كل منهما فردًا يشبه الخلية الأم، كما هو الحال في الخلايا البكتيرية والفطريات،

أو تبرعم الخميرة Yeast Budding، أو التجزؤ Fragmentation؛ أي انفصال جزء من خيوط الطحلب، فينمو معطيًا نباتًا جديدًا مشابهًا تمامًا للطحلب الأصلي. والنوع الآخر من التكاثر لدى الأحياء الدقيقة يعرف باسم التكاثر الجنسي Sexual reproduction، يأتي نتيجة اتحاد مشيجين أحدهما مشيج مذكر والثاني مشيج مؤنث يندمجان لتكوين خلية تسمى البيضة الملقحة أو اللاقحة Zygote، التي تنقسم انقسامات متتالية مكونة فردًا جديدًا يتميز بالتطور والتبدل في صفاته الوراثية بسبب الطفرات Mutations التي تختلف باختلاف الكائن الحي والظروف البيئية المحيطة (Oh et. al. 2005, Kiprono et. al. 2018b, Ley et. al. 2006, Paul & Clark 1989).

تتم زراعة الكائنات الحية الدقيقة في المختبرات والمعامل بواسطة توفير الأوساط الغذائية المناسبة للنمو Mediaفي أنابيب اختبار Test tubes أو أطباق بتري Petri Dishes أو دوارق مخروطية Conical flasks أو غير ذلك ما يسمح بدخول الضوء إلى الكائن الحي، ويمكنه من المعيشة في ظروف معقمة، ويتم تعقيم الوسط الغذائي بواسطة جهاز الأوتوكلاف Autoclave، ويكون التعقيم بواسطة بخار الماء عند درجة حرارة

121 وتحت ضغط محدد (نحو 15 رطلًا في كل بوصة مربعة) لمدة 15-30 دقيقة تكون كافية لقتل جميع الكائنات الحية الدقيقة، على أن تكون فوهات أنابيب الاختبار أو الدوارق المخروطية أو القوارير الحاوية للأوساط الغذائية مسدودة بإحكام بواسطة القطن غير الممتص Nonabsorbent cotton، وهذا الوسط أو المنبت الغذائيCulture medium يختلف باختلاف الكائن الحي وتنوع احتياجاته الغذائية، ويتطلب نمو الكائن الحي توفير المواد الغذائية بشكل مناسب وبكمية كافية لاستعمالها بوصفها مواد بناء للخلايا الجديدة ومصدرًا للطاقة اللازمة لنمو وانقسامات الكائنات الحية الدقيقة، ويقصد بالمزرعة أو المنبت الغذائي أي نمو أو إكثار للكائنات الحية الدقيقة في المختبرIn vitro . والوسط أو المنبت الغذائي عبارة عن المحلول أو المركب الغذائي الذي تزرع أو تنمو عليه الكائنات الحية الدقيقة، ويحفظ عند درجة حرارة ورطوبة مناسبة وضغط معروف ولمدة محددة من الوقت (Pawlowska & Charvat 2004).

ومن الجدير بالذكر أن هذه المزارع قد تكون نقية؛ أي تحوي نوعًا واحدًا فقط من الكائنات الحية الدقيقة، فتسمى Pure culture أو تكون مختلطة من عدد من الأنواع المختلفة Mixed culture، وهذا هو الغالب الأعم في أطباق العزل الميكروبي بحكم وجود الأحياء الدقيقة من بكتيريا وبكتيريا خضراء مزرقة وريكتسيات وفطريات وطحالب وأشنات مع بعضها في الطبيعة في كل مكان، سواءً كان ذلك في الهواء أو في التربة أو في الماء أو غيرها من الأوساط البيئية المتنوعة.

في المختبرات يتم حفظ الكثير من الكائنات الحية الدقيقة على منابت صلبةSolid media حيث يضاف لهذه البيئات 1.5% من مادة الآجار Agar ليتصلب ويتماسك الوسط المغذي، ويتم حفظ بعض الكائنات الحية الدقيقة في منابت سائلة Liquid media لحين استخدامها من قِبل الباحثين أو لأغراض التدريس وعرضها أمام الطلاب والطالبات. هذا، وتوضع البيئات المحقونة Inoculums media في حاضنات Incubations في ضوء خافت Dim light عند درجة حرارة مناسبة تتراوح بين 25 عند عزل الفطريات والطحالب و37 عند عزل البكتيريا والبكتيريا الزرقاء، وعلى الرغم من أن درجة الحرارة تختلف من كائن حي لآخر، فعلى سبيل المثال طحالب جنس Chlorella spp. التي تعيش في الينابيع الحارة يتم تنميتها عند درجة حرارة 40 للحصول على الكتلة الخلوية لهذا الجنس في المختبر، ومدة التحضين تكون 24 ساعة بالنسبة إلى البكتيريا و5-7 أيام عند عزل الكائنات الفطرية والطحلبية (Juillard et. al. 1996, Kiprono et. al. 2018a, Lindgren & Dobrogosz 1990).

وعلاوة على ضرورة توافر الاحتياجات الغذائية في المنبت أو الوسط الغذائي، فإنه يجب ضبط قيمة الأس الهيدروجيني pH (وهو اللوغاريتم السالب لتركيز أيون الهيدروجين) في الوسط ليكون مناسبًا لنمو الكائن الحي وتكاثره، حيث نجد أن البكتيريا تفضل النمو في المنابت القلوية الضعيفة pH 8-6 بينما يلاحظ أن الفطريات تفضل العيش في الأوساط الحامضية الضعيفة pH 6-4. وينبغي ملاحظة أن هناك كائنات حية دقيقة هوائية Aerobic ينبغي إمداد بيئاتها الغذائية بما تحتاج إليه من الأوكسجين بكميات كافية، وفي المقابل هناك كائنات حية دقيقة لا هوائية Anaerobic ينبغي حجب الأوكسجين عنها تمامًا، وبينهما طائفة ثالثة تحتاج إلى الأوكسجين بكميات قليلة كي تنمو، وتعيش، وتسمى Microaerophilic.

وتشير الدراسات إلى أن أول محلول استعمل لزراعة الكائنات الحية الدقيقة كان عبارة عن مستخلص لمواد طبيعية غنية بالمواد العضوية والأملاح، مثل مستخلص القش وحب الفلفل الذي استخدمه العالم لوين هوك، وقام باحثون آخرون باستخلاص أنسجة الحيوان بالماء، حيث تمكنوا من الحصول على أوساط غذائية ممتازة لزراعة البكتيريا، ويعرف مستخلص الأنسجة بالنقيع Infusion وكان يُعدّ الوسط الغذائي الوحيد لعزل وزراعة البكتيريا في المختبر حتى أواخر القرن التاسع عشر الميلادي، ومن بين المنابت المناسبة لحفظ وزراعة الكائنات الحية الدقيقة تلك المكونة

من المرق المغذي Nutrient Broth في حال البكتيريا والفطريات، والمكونة من تربة مشبعة بالماء أو مستخلص التربة Soil extract والآجار في حال عزل الكائنات الطحلبية.

والمنابت الغذائية الصناعية المستخدمة لعزل الأحياء الدقيقة في المختبر يجب أن تكون قريبة الشبه أو مماثلة قدر الإمكان في مكوناتها لتلك التي تعيش عليها هذه الكائنات في بيئتها الطبيعية In vivo. والكائنات الحية الدقيقة ليست متماثلة في احتياجاتها ومتطلباتها الغذائية، بل هناك تباين كبير فيما بينها، حيث إن بعضها لديه القدرة على تخليق بعض ما تحتاج إليه من المواد الغذائية بطريقة ذاتية Autotrophic، فتأخذ احتياجاتها العضوية من غاز ثاني أكسيد الكربون بوصفه مصدرًا كربونيًّا. وفي المقابل نجد أن البعض الآخر من الكائنات الحية الدقيقة غير ذاتي التغذية Heterotrophic، وهذه لا تنمو إلا إذا أضيف لمنبتها مصدر كربوني عضوي، وإن هناك من الكائنات الحية الدقيقة من لديه القدرة على تثبيت النيتروجين الجوي اللازم لبناء جسمه خلال عملية تعرف بالتآزت Nitrogen fixation. بينما بعضها يتطلب نموه إضافة مصدر نيتروجيني عضوي أو غير عضوي إلى الوسط الغذائي المراد تنميته فيه. أضف إلى ذلك قدرة بعض الكائنات الحية الدقيقة على تخليق احتياجاتها من الفيتامينات، بينما نجد البعض الآخر يحتاج إلى إضافة بعض الفيتامينات إلى منبته الغذائي لكي ينمو، ويتكاثر.

وتجدر الإشارة إلى أن هناك طوائف عدة من الكائنات الفيروسية والبكتيرية والفطرية لا يمكن تنميتها في المنابت الصناعية، حتى ولو اشتملت على كل العناصر الضرورية اللازمة لنموها، ومثل هذه الكائنات تعرف باسم الطفيليات إجبارية التطفل Obligate parasite، حيث لا تنمو إلا على أنسجة حية مأخوذة من عوائلها.

ومن أجل ذلك كله ينبغي مراعاة كل الفروق والعوامل السابقة وغيرها عند تركيب وإعداد مكونات المنابت الغذائية للأحياء الدقيقة، حيث يجب توافر العناصر الضرورية الأساسية اللازمة التي يحتاج إليها الكائن الحي في الوسط الغذائي المراد تنميته فيه؛ وذلك للحصول على كتلة حيوية كافية من هذا الكائن الحي أو ذاك، ويأتي في مقدمة العناصر الضرورية الأساسية اللازمة لتغذية الكائن الحي، التي ينبغي توافرها في الوسط الغذائي: الكربون، والنيتروجين، والهيدروجين، والأوكسجين، والكبريت، والفسفور، والصوديوم، والبوتاسيوم، والكالسيوم، والمغنيسيوم، والمنجنيز، والحديد، والزنك، والكوبلت، وغيرها من العناصر الأخرى التي تختلف وتتنوع باختلاف الكائن الحي وتنوعه (Oh et. al. 2007, Lopitz-Otsoa et. al. 2006, Paul 2007). وإن الماء وسط مذيب لجميع هذه العناصر ومهم في حياة الكائن الحي، بل إنه عامل محدد Limited Factor في نموها، حيث تعتمد عليه حياة جميع الكائنات الحية، وتتوقف على وجوده، فتستطيع الكائنات الحية الدقيقة امتصاص المواد الغذائية من الوسط الذي تعيش فيه عندما تكون هذه المواد في صورة ذائبة بفعل وجود الماء.

وقد ساعدت التقنيات الحديثة المستخدمة في زراعة وتنمية الأحياء الدقيقة في المختبرات على إحداث تقدم ملموس في مجال دراسة الأحياء الدقيقة، حيث مكنت الباحثين والعلماء من تتبع دورات الحياة لهذه الكائنات الحية الدقيقة ودراسة تراكيبها الفسيولوجية وخصائصها التركيبية والتقسيمية والوراثية والبيوكيميائية وأنشطتها الأيضية وإفرازاتها الأنزيمية بشكل دقيق وموسع، فاليوم نجد أن المنابت الغذائية أصبحت تستعمل لأغراض عدة، علاوة على حفظ الكائنات الحية الدقيقة واستكثارها ودراسة خواصها الفسيولوجية، حيث دخلت الأغراض الصناعية والطبية في هذا المجال، فنجد أن المنابت والأوساط الغذائية للكائنات الحية الدقيقة تستغل لإنتاج الأحماض العضوية، والكحولات، وبعض الفيتامينات، والهرمونات، والمضادات الحيوية، وغيرها من المواد ذات الأهمية الاقتصادية في حياة الإنسان.

إن معظم الكائنات الحية الدقيقة تمر في أثناء نموها في مجتمعات بأربع مراحل أساسية: أولها المرحلة التمهيدية Lag phase وتليها المرحلة اللوغاريتمية Exponential phase ثم المرحلة الساكنة Stationary phase وآخر هذه المراحل ما يعرف بمرحلة الموت Death phase وهذا ما يعرف بدورة النمو (Loessner et. al. 2003).

- **منحنى النمو في الأحياء الدقيقة Growth curve of microorganisms**

- **المرحلة التمهيدية Lag phase**

تعرف هذه المرحلة بطور الركود في عملية الانقسام، وفيها تبدأ الخلايا في عملية البناء البروتوبلازمي بداخل الخلية، ويزداد حجم الخلية إلى ثلاثة أضعاف حجمها الأصلي، وهذه المرحلة تبدأ بحقن المزرعة أو الوسط الغذائي بالكائن الحي، الذي يحتاج إلى بعض الوقت ليستأنف نشاطه في المزرعة الجديدة؛ ولذلك تسمى هذه المرحلة بالمرحلة التحضيرية، ويعتمد طولها على عمر الخلايا المنقولة، ولقد بينت الدراسات البيوكيميائية زيادة معدل النشاط الأيضي للخلية وزيادة كمية المكونات الأساسية للمحتويات النووية والمحتويات البروتينية بالخلية خلال المرحلة التمهيدية.

- **المرحلة اللوغاريتمية Log phase**

في هذه المرحلة يكون معدل إنتاج الأفراد والخلايا الجديدة متزايدًا مع مرور الوقت، وفي تناسب طردي مع الزمن، فيحدث النمو اللوغاريتمي نتيجة لتضاعف الخلايا بعد كل وقت جيلي وتحت الظروف المثلى Optimal conditions، والوقت الجيلي يكون ثابتًا خلال طور النمو اللوغاريتمي، وإن طول الوقت الجيلي يتحدد عادة بكل من العوامل الوراثية والظروف البيئية. وتختلف معدلات النمو لأي نوع معين من الكائنات الحية الدقيقة باختلاف الوسط الغذائي ومكوناته ودرجات الحرارة والحموضة pH والرطوبة وغيرها من العوامل التي تؤثر بشكل مباشر أو غير

مباشر في نمو الكائن الحي وانقسامه، علمًا أن الكائنات الحية الدقيقة بدائية النواة (البكتيريا) تتكاثر بشكل أسرع من الكائنات الدقيقة ذات النواة الحقيقية في المرحلة اللوغاريتمية.

- **المرحلة الساكنة Stationary phase**

تأتي هذه المرحلة بعد مرحلة النمو اللوغاريتمي التي تنتهي بنفاد المواد الغذائية من المنبت أو زيادة تركيز المواد الأيضية والمخلفات ذات التأثير السام الناتجة من النشاط الخلوي، وتسمى هذه المرحلة بطور ثبات النمو، وفيه تتوقف المزرعة عن النمو عندما تصل إلى حد معين، ويبدأ معدل التكاثر في التناقص إلى أن يتوازن مع معدل موت الخلايا في الوسط الغذائي، ويلاحظ أن الخلايا في المرحلة الساكنة تكون أصغر من الخلايا في المرحلة اللوغاريتمية، وإنها تكون أكثر مقاومة للظروف البيئية غير المناسبة مثل الحرارة، والرطوبة، والجفاف، ودرجة الحموضة pH في المنبت أو الوسط الغذائي.

- **مرحلة الموت Death phase**

إن معدل موت الخلايا في هذه المرحلة يزيد عن معدل تكوين خلايا حية جديدة بالتكاثر؛ لذلك تسمى هذه المرحلة من عمر المزرعة الميكروبية طور تناقص النمو أو طور الموت Decline or death phase، وفي هذه المرحلة قد لا يلاحظ نقص في العدد المجهري المباشر لخلايا الكائن الحي، إلا إذا كان الموت فيها مصحوبًا بتحلل الخلايا الميتة. ومن الجدير بالذكر أن موت الخلايا في هذه المرحلة يتم بطريقة لوغاريتمية؛ أي يتناسب طرديًّا مع الوقت، ويختلف معدل الموت باختلاف الأحياء الدقيقة والوسط الذي تعيش فيه والظروف البيئية المحيطة، فقد يستمر ثبات معدل الموت أيامًا عدة، وقد تموت كل الخلايا خلال هذه المدة، تبعًا لنوع الكائن الحي وخصائصه؛ لذا تتراوح هذه المرحلة من ساعات إلى أيام عدة أو شهور أو حتى سنوات.

إن المنابت أو الأوساط الغذائية Cultures media للكائنات الحية الدقيقة تتباين في مكوناتها بتباين الكائنات الحية الدقيقة النامية عليها، وبما يتلاءم وطبيعة وخصائص وحاجة الكائن الحي الذي يتغذى عليها، وعمومًا تصنف المنابت الغذائية المتنوعة لتنمية وإكثار الكائنات الحية الدقيقة على أساس مكوناتها وقوامها وقدراتها الإنتاجية، وذلك على النحو الآتي:

تنمية الكائنات الحية الدقيقة في مزارع الدفعات Microbial growth in batch cultures

في هذا النوع من المزارع لا يستمر النمو اللوغاريتمي أجيالًا عدة، بل يكون لأجيال محدودة فقط؛ وذلك لعدم تجدد العناصر الغذائية في مزارع الدفعات، بينما نجد أنه في المزارع المستمرة Continuous cultures يمكن الاحتفاظ بمرحلة النمو اللوغاريتمي مددًا زمنية طويلة بفعل استخدام نظام الزرع المستمر الكيموستات Chemostat الذي يجدد محتويات المنبت الغذائي بشكل

مستمر، ويتم من خلال مزارع الدفعات الحصول على خلايا فردية من المزارع ذات العمر الواحد Synchronous cultures؛ أي خلايا كلها في المرحلة نفسها من دورة حياة الخلية، وذلك بخلاف النمو الأولي في المنبت الغذائي الذي يضم مجتمعًا بأعداد هائلة من الخلايا للكائنات الحية تكون ذات أعمار مختلفة وأحجام متباينة، ويمكن الحصول على المزارع ذات العمر الواحد بطرق عدة من خلال وسائل التقنية الحديثة. فمثلًا يمكن استخدام مؤثرات بيئية محددة تحفز الخلايا على الانقسام في الوقت نفسه وعلى أوقات متماثلة، وفي بعض الأنواع البكتيرية يمكن تحقيق ذلك بنقل المزارع على أوقات متساوية إلى درجات حرارة مرتفعة ومنخفضة، أو بوضع خلايا بدأت لتوها في مرحلة السكون في وسط غذائي جديد (Hughes & Kim 1973, Mounier 2008, Jay 1987).

وإضافة إلى ذلك هناك عملية الفصل الطبيعي لخلايا المزرعة الميكروبية، التي يمكن من خلالها الحصول على خلايا ذات عمر واحد بواسطة الترشيح أو الطرد المركزي، حيث تؤدي إلى فصل الخلايا حديثة الانقسام عن الخلايا الأكبر عمرًا، والطريقة التي تختار بها هذه الخلايا تعرف باسم طريقة هيلمستتر كامينجز Helmstetter-cummings وهذه الطريقة مبنية على أساس أن بعض الأنواع البكتيرية تلتصق بشدة بأغشية ملليبور مكونة من نترات السليلوز Cellulose nitrate. وفي هذه الطريقة يتم ترشيح مزرعة بها خلايا مختلفة أعمارها على غشاء ملليبور، ثم يقلب الغشاء، ويغسل بتيار خفيف من منبت غذائي معقم تم تحضيره مسبقًا، فالخلايا شديدة الالتصاق بالغشاء تبقى والأخرى تغسل مع التيار، وهي الخلايا الصغيرة حديثة الانقسام، ثم تجمع كميات السائل الراشح بعد مروره على غشاء الترشيح، ويكون بمعدل ثابت كل دقيقتين، وهذا يحتوي على خلايا متقاربة في العمر بدرجة كبيرة.

تنمية الكائنات الحية الدقيقة في مزارع مستمرة Microbial growth in continuous cultures

في بعض الأحيان ولأغراض بحثية وإنتاجية يتطلب الأمر وجود مزرعة ميكروبية على حالتها المزرعية في المختبر لمدة طويلة، وذلك عند مرحلة محددة من مراحل النمو، ولتكن مثلًا مرحلة النمو اللوغاريتمي، وفي المزارع المستمرة أو الدائمة يمكن الاحتفاظ بمرحلة النمو اللوغاريتمي لأوقات زمنية طويلة بفعل استخدام نظام الزرع المستمر الذي يعرف بالكيموستات Chemostat، حيث تكون غرفة النمو متصلة بمستودع يحتوي على منبت غذائي معقم، وتزود المزرعة آليًا بمنابت طازجة، بمعدل يوازي ما يستهلك من المواد الغذائية في المزرعة التي بدأ فيها النمو، وهذا يتطلب سحب قدر معلوم من المزرعة على أن تعوض بدلًا منه من منبت جديد طازج. وأما الجزء المأخوذ من المزرعة فيستغل في استخلاص المنتج أو المادة التي من أجلها أعدت المزرعة، وإذا دخل المنبت الجديد بمعدل ثابت إلى غرفة النمو Growth chamber فإن كثافة الميكروب في غرفة النمو تظل ثابتة بعد مدة ضبط في بداية تشغيل الكيموستات، ويتم آليًا ضبط كل المتغيرات للحصول على طور النمو المطلوب لمدة زمنية طويلة، كضبط المكونات الغذائية، ودرجة الحموضة

والرطوبة والتهوية ودرجة الحرارة، وغيرها من العوامل التي تؤثر في نمو المزرعة (Mounier et. al. 2005, Nakatsuji et. al. 2018).

ويوجد نظام آخر مماثل للزرع المستمر يسمى نظام العكارة Turbidostat، يختلف عن الكيموستات في أنه يشمل وسائل بصرية حساسة لقياس الامتصاص الضوئي Absorbance في غرفة النمو، وهو الذي يتحكم في معدل انسياب المنبت الجديد من المستودع من خلال صمام يعمل بشكل آلي، بناءً على درجة التعكير في غرفة النمو، وهذا بدوره يتحكم في معدل النمو، بينما الكيموستات ينساب فيه المنبت الجديد من المستودع بمعدل معين للحصول على معدل نمو للمزرعة يتناسب مع معدل الانسياب المذكور.

النمو البكتيري المتزامن

يقصد بالنمو البكتيري المتزامن العمل على إيجاد مزرعة بكتيرية خلاياها متماثلة، من حيث أن تكون جميعها في طور نمو واحد أو مرحلة نمو موحدة، وإن خلايا هذه المزرعة تنمو وتنقسم في الوقت نفسه وبمعدل مشترك لتصبح كل خلايا المزرعة متجانسة، وللحصول على النمو المتزامن لخلايا المزرعة البكتيرية يجب التحكم التام في جميع الظروف البيئية المحيطة بالمنبت أو الوسط الغذائي مثل درجة الحرارة، والرطوبة، والجفاف، ودرجة الحموضة pH، وكمية الأوكسجين، وشدة الإضاءة، وغير ذلك. ويمكن تحقيق هذا التجانس من خلال الجوانب الثلاثة الرئيسة الآتية:

- إضافة مادة نمو أساسية موحدة لتكوين منتج مهم للخلية، بحيث لا تبدأ الخلايا في عملية الانقسام إلا في وجود هذه المادة، فهي بمثابة عامل محدد Limited factor لنمو خلايا المزرعة وانقسامها، ومن دونها لا يمكن أن يحدث انقسام لأي من الخلايا، وبذلك نضمن أن تكون المزرعة متزامنة فيما يتعلق بانقسام خلاياها في وقت واحد، وما سوف يترتب على ذلك من نمو وتكاثر وخلافه من الأنشطة البيوكيميائية والفسيولوجية والإفرازات الأيضية.

- استخدام مرشحات ذات أبعاد محددة، لترشيح خلايا المزرعة البكتيرية من خلالها، بشرط أن تكون هذه المرشحات لا تسمح إلا بمرور الخلايا حديثة الانقسام لصغر حجمها، وتؤدي هذه الطريقة إلى ضمان أن السائل الراشح يحتوي على خلايا متجانسة في أحجامها، وأعمارها، فتتشابه في الخصائص والأنشطة البيولوجية في هذا النوع من المزارع ذات النمو المتزامن.

- الانتخاب الطبيعي لخلايا المزرعة، ويتم ذلك من خلال تعريض خلايا المزرعة البكتيرية لعوامل نمو بيئية محددة بشكل متزامن؛ ليتسنى تحديد وانتقاء خلايا معينة دون غيرها لديها القدرة على مواصلة النمو والتكاثر في مزرعة متجانسة. فمثلًا يمكن تعريض المزرعة البكتيرية لدرجات حرارة منخفضة ومرتفعة على أوقات متساوية، ولتكن 25 و37 على التوالي.

احتياجات النمو الميكروبي Requirements of Microbial Growth

الكائنات الحية الدقيقة ليست متماثلة في احتياجاتها ومتطلباتها الغذائية، بل هناك تباين كبير فيما بينها، حيث إن بعضها ذاتي التغذية Autotrophic، يمكنها أن تنمو وتكون مكوناتها الخلوية من مركبات غير عضوية، فتأخذ احتياجاتها العضوية من غاز ثاني أكسيد الكربون بوصفه مصدرًا كربونيًّا. وفي المقابل نجد أن البعض الآخر من الكائنات الحية الدقيقة غير ذاتية التغذية Heterotrophic، تحتاج إلى واحد أو أكثر من المواد الغذائية العضوية لكي تنمو وتكون مادتها الخلوية، فهذه لا تنمو إلا إذا أضيف لمنبتها مصدر كربوني عضوي، وإن هناك من الكائنات الحية الدقيقة من لديه القدرة على تثبيت النيتروجين الجوي بواسطة عملية تعرف بالتآزت Nitrogen fixation، بينما بعضها يتطلب نموه إضافة مصدر نيتروجيني عضوي أو غير عضوي إلى الوسط الغذائي المراد تنميته فيه، إضافة إلى قدرة بعض الكائنات الحية الدقيقة على تخليق احتياجاتها من الفيتامينات والأحماض الأمينية، بينما نجد أن بعضها الآخر يحتاج إلى إضافة هذه الفيتامينات إلى وسطها الغذائي لكي تنمو وتتكاثر، ويكون ذلك بدرجات متفاوتة بين الأنواع المختلفة وعلى مدى واسع فيما يتعلق باحتياجاتها من المكونات الغذائية (Hughes & Poole 1989, Jay 2000).

فعلى سبيل المثال هناك البكتيريا Streptococcus pyogenes المسببة لمرض الحمى القرمزية والتهاب الحلق تحتاج إلى 15 حمضًا أمينيًّا لكي تنمو وتُكوّن مادتها الخلوية، وعلاوة على أن هناك طوائف عدة من الكائنات الفيروسية والبكتيرية والفطرية لا يمكن تنميتها في المنابت الصناعية حتى ولو اشتملت على كل العناصر الضرورية اللازمة لنموها، فلا تنمو إلا على أنسجة حية مأخوذة من عوائلها، ومثل هذه الكائنات تعرف باسم إجبارية التطفل Obligate parasite؛ أي لا تعيش، ولا تتكاثر إلا داخل خلايا الكائن الحي.

ويأتي في مقدمة العناصر الضرورية الأساسية اللازمة لتغذية الكائن الحي، التي ينبغي توافرها في الوسط الغذائي بجانب الماء الذي يعمل بوصفه وسطًا مذيبًا لجميع العناصر الغذائية ومهمًّا في حياة الكائن الحي كل من: الكربون، والنيتروجين، والهيدروجين، والأوكسجين، والكبريت، والفسفور، والصوديوم، والبوتاسيوم، والكالسيوم، والمغنيسيوم، والمنجنيز، والحديد، والزنك، والكوبلت، وغيرها من العناصر الأخرى التي تختلف وتتنوع باختلاف الكائن الحي وتنوع احتياجاته الغذائية.

وترجع الاختلافات في الاحتياجات الغذائية بين الكائنات الحية الدقيقة إلى اختلافاتها في القدرات التمثيلية الغذائية، التي يحكمها التركيب الوراثي للكائن الحي والعوامل البيئية التي يعيش فيها هذا الكائن الحي، ويؤثر فيها، ويتأثر بها، فالتراكيب الوراثية لخلية الكائن الحي تُعدّ بمثابة إمكانيات وقدرات لديه، بينما العوامل البيئية والبيئة المحيطة التي يعيش فيها الكائن الحي هي التي تتيح أو لا تتيح الفرصة لهذه الإمكانيات لأن تترجم في صورة نمو، أو تكوين مواد خلوية جديدة، فالقدرة الخلوية على استخدام مركب معين بوصفه مصدرًا للطاقة، أو استخدام مواد غير عضوية لبناء بروتين أو أغشية خلوية، تعتمد في الأساس على وجود مجموعة من الأنزيمات، علمًا أن المادة

الوراثية بالخلية والبيئة يتحكمان بشكل مباشر أو غير مباشر في تكوين هذه الأنزيمات (Morrissey et. al. 2004).

وبهذا يمكن القول: إن عدم وجود جين ما يكون مسؤولًا عن تكوين أنزيمات معينة في خلية الكائن الحي، أو وجود جين يثبط نشاط هذه الأنزيمات، كل ذلك يؤدي بالكائن الحي إلى إحداث تغيرات في احتياجاته الغذائية، فعندما يتغير التركيب الوراثي لخلية بكتيرية بسبب وجود طفرة معينة Mutation، يلاحظ أن الخلية الناتجة عن الطفرة قد تفقد القدرة على تكوين حمض أميني معين أو فيتامين محدد أو غيرهما من المكونات الأساسية للخلية البكتيرية (الترك وآخرون 2002م). وعليه يشترط لاستمرار نمو الكائن الحي توفير المواد والمركبات التي لم يعد قادرًا على بنائها في المنبت أو الوسط الغذائي لهذا الكائن الحي.

من أجل ذلك كله ينبغي مراعاة كل الفروق والعوامل السابقة وغيرها عند تركيب وإعداد مكونات المنابت الغذائية للأحياء الدقيقة، حيث يجب توافر العناصر الضرورية الأساسية اللازمة التي يحتاج إليها الكائن الحي في الوسط الغذائي المراد تنميته فيه؛ وذلك للحصول على كتلة حيوية Biomass كافية من هذا الكائن الحي أو ذاك، حيث إن إجراء البحوث والدراسات التطبيقية تحتاج إلى أعداد هائلة وكتلة حيوية كافية من خلايا الكائنات الحية الدقيقة لمعاملتها بعدد من المحاليل أو المركبات حتى تعطي نتائج واضحة ودلالات معنوية يمكن الاعتماد عليها وتحليلها إحصائيًّا (Jeffrey 1983).

إضافة إلى مكونات المنابت الغذائية للأحياء الدقيقة من أملاح معدنية وعناصر غذائية ومعادن وماء، ينبغي تهيئة جميع الظروف البيئية المحيطة بالمنبت أو الوسط الغذائي مثل درجة الحرارة، والرطوبة، والجفاف، ودرجة تركيز الأس الهيدروجيني pH، وكمية الأوكسجين الذائب، وشدة الإضاءة، وغيرها، وجعل جميع هذه الظروف البيئية

أو العوامل المحيطة في حدودها المثلى Optimal conditions المناسبة لنمو وتكاثر الكائن الحي وفق الخصائص التركيبية والوراثية المميزة للكائن الحي، حيث إن الكائنات الحية الدقيقة حساسة جدًّا إلى حد بعيد لهذه العوامل البيئية المتنوعة، سواءً كانت مفردة أو مجتمعة، فقد تتوافر المواد الغذائية بدرجة كافية في المنبت أو الوسط الغذائي، وعلى الرغم من ذلك لا ينمو فيه الكائن الحي بدرجة كافية، ولو فتشنا عن السبب الحقيقي الذي أدى إلى تثبيط نمو الكائن الحي لوجدناه يعود إلى اختلال أحد العوامل البيئية المحيطة بالكائن الحي.

وبشكل عام، فإن نشاط ونمو الأحياء الدقيقة يتأثر كثيرًا بالظروف الطبيعية والكيميائية والفيزيائية للبيئات التي تعيش فيها هذه الكائنات؛ لذلك نجد أن لكل بيئة من البيئات على سطح الكرة الأرضية -سواءً كانت يابسة أو مائية- ما يميزها من الكائنات الحية، وهي تلك التي تملك خصائص تركيبية وصفات وراثية تجعلها قادرة على العيش والنمو والتكاثر في هذه البيئة دون غيرها من سائر

البيئات المتنوعة، أو قد تكون هذه الكائنات الحية تكيفت أو تأقلمت مع مرور الزمن لتصبح قادرة على تحمل الظروف والعوامل البيئية السائدة في هذه البيئة، وتعيش فيها بسهولة، وتتكاثر أجيالها.

علمًا أن الأحياء الدقيقة لا تستجيب للمؤثرات البيئية المختلفة بطريقة واحدة أو بدرجة متماثلة سائدة بين جميع الأنواع الموجودة في بيئة من البيئات، بل على العكس من ذلك تمامًا، حيث يلاحظ أن بعض المؤثرات البيئية الضارة لبعض الأحياء الدقيقة قد تكون في الوقت نفسه مفيدة لأحياء دقيقة أخرى. ومن الجدير بالذكر أن الأحياء الدقيقة تستطيع تحمل بعض الظروف البيئية غير المناسبة في أثناء نموها إلى حد أو مدى معين يسمى مدى التحمل Tolerance rang؛ لذا نستطيع القول: إن هناك فرقًا بين تحمل الأحياء الدقيقة للظروف البيئية غير المناسبة وبين معيشتها في الظروف البيئية المثلى، فالكائنات الحية الدقيقة قد تعيش في بيئة ظروفها غير مناسبة، وعلى الرغم من أن هذه الظروف تؤثر في أنشطتها وتكاثرها، فالفرق واضح بين تأثير الظروف البيئية في نشاط وتكاثر الأحياء الدقيقة وبين تأثير الظروف البيئية في حياة تلك الأحياء الدقيقة.

رابعًا: تغذية الأحياء الدقيقة

Nutrition of Microorganisms

إن وجود الأحياء الدقيقة في بيئة معينة يدل على تكيفها مع هذه البيئة، ويدل على أنها تلبي احتياجاتها الغذائية اللازمة كي تنمو وتتكاثر في هذه البيئة دون غيرها من البيئات، فنمو الكائنات الحية يتطلب حصولها على كل المواد اللازمة لبناء مكوناتها وكذلك المواد اللازمة لإنتاج الطاقة من البيئة التي تعيش فيها، وهذه المواد تسمى مغذيات أو عناصر غذائية Nutrients، وتنقسم إلى قسمين رئيسين هما: العناصر الكبرى Macronutrients وهي العناصر الغذائية التي توجد بكميات كبيرة في المادة الجافة لخلية الكائن الحي (أكثر من 95% الوزن الجاف للخلية)، ويحتاج منها الكائن الحي إلى نسب كبيرة في تغذيته، وتشمل ستة عناصر هي: الهيدروجين، والأوكسجين، والكربون، والنيتروجين، والفسفور، والكبريت. أما العناصر الصغرى Micronutrients فهي العناصر الغذائية التي توجد بكميات بسيطة في المادة الجافة لخلية الكائن الحي، ويحتاج منها الكائن الحي إلى نسب ضئيلة في تغذيته تتفاوت في كميتها، ومنها: البوتاسيوم، والصوديوم، والمغنيسيوم، والكالسيوم، والحديد، والمنجنيز، والكوبلت، والموليبدنم، والزنك (Nseir et. al. 2007).

وتضاف هذه المعادن المختلفة وكذلك الفسفور في صورة أملاح معدنية إلى الوسط الغذائي، ويمكن للخلية أن تحصل منها على الكاتيونات المنفردة. إضافة إلى أملاح السليكات التي تحتاج إليها بعض المجموعات الحية مثل الدياتومات Diatoms وبعض الطحالب ذات الجدار الخلوي الغني بالسليكا؛ ولذلك فهي تحتاج إلى السليكون Silicon في تغذيتها، علمًا أن خلية الكائن الحي تحتوي على نسبة عالية تتراوح بين 80-90% من وزنها الكلي من الماء، وهو يُعدّ من أهم محتويات الخلية من الناحية الكمية وعنصر أساسي من عناصر تغذية الكائنات الحية الدقيقة، علاوة على الدور الذي

يقوم به بوصفه وسطًا مذيبًا للمواد والمركبات التي يحتاج إليها الكائن الحي في تغذيته، وتشير الدراسات إلى أن الكائنات الحية الدقيقة تختلف فيما بينها اختلافًا كبيرًا من حيث احتياجها للصوديوم؛ وذلك بسبب البيئة التي تعيش فيها، فنجد أن البكتيريا البحرية أو الكائنات الحية الدقيقة المحبة للملوحة Halophytic بشكل عام وبعض أنواع البكتيريا الزرقاء والبكتيريا الممثلة للضوء جميعها تحتاج إلى تركيزات عالية من الصوديوم، وإنه لا يمكن إحلال الصوديوم في تلك الحالات بأي عناصر غذائية أخرى أو أملاح أحادية التكافؤ Monovalent، في حين أن نسبة الصوديوم لا تتجاوز 1% من وزن المادة الجافة لمعظم الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في الطبيعة.

الجدول (1-2): نسب العناصر الكيميائية للمادة الجافة لخلايا الكائنات الحية.

العنصر Element	النسبة من المادة الجافة
الكربون Carbon	50 %
الأوكسجين Oxygen	20 %
النيتروجين Nitrogen	14 %
الهيدروجين Hydrogen	8 %
الفسفور Phosphor	3 %
الكبريت Sulfur	1 %
البوتاسيوم Potassium	1 %
الصوديوم Sodium	1 %
الكالسيوم Calcium	0.5 %
المغنيسيوم Magnessium	0.5 %
الكلورين Chlorine	0.5 %

الحديد Iron	0.2 %
بقية المعادن metals Other	0.3 %

وفيما يتعلق بالوظائف الفسيولوجية العامة للعناصر الغذائية الأساسية المختلفة الداخلة في تركيب خلايا الكائنات الحية الدقيقة، فيمكن توضيحها بشيء من التفصيل في الجدول (1-3) الآتي:

الجدول (1-3): الوظائف الفسيولوجية للعناصر الغذائية في خلايا الكائنات الحية الدقيقة.

العنصر Element	الوظائف الفسيولوجية
الكربون Carbon	أحد مكونات المادة العضوية في الخلية.
الأوكسجين Oxygen	أحد مكونات الماء الخلوي والمادة العضوية في الخلية.
النيتروجين Nitrogen	يدخل في تكوين البروتين والأحماض النووية ومرافقات الأنزيمات.
الهيدروجين Hydrogen	أحد مكونات الماء الخلوي والمادة العضوية في الخلية.
الفسفور Phosphor	مكون للأحماض النووية والفوسفوليبيدات ومرافقات الأنزيمات.
الكبريت Sulfur	مكون للبروتين (للأحماض الأمينية السيستين والميثيونين) ومرافقات الأنزيمات.
البوتاسيوم Potassium	أحد الكاتيونات الأساسية في الخلايا، وعامل مساعد لبعض الأنزيمات.
الكالسيوم Calcium	كاتيون مهم في الخلية، وهو عامل مساعد للأنزيمات المحللة للبروتين.
المغنيسيوم Magnessium	كاتيون مهم في الخلية، وأحد مكونات الكلوروفيل، وعامل مساعد لبعض الأنزيمات.
المنجنيز Manganese	عامل مساعد لبعض الأنزيمات، ويحل أحيانًا محل المغنيسيوم في تفاعل بعض الأنزيمات في الخلية.
الكوبلت Cobalt	أحد مكونات فيتامين ب12 والمرافق الأنزيمي المشتق منه.
الحديد Iron	من مكونات السيتوكرومات وبروتينات الهيم ومصاحب لبعض أنزيمات التنفس.
النحاس والزنك والموليبدنم	مكونات معدنية لبعض الأنزيمات الخاصة. والموليبدنم له دور في عملية تثبيت النيتروجين الجوي fixation Nitrogen

تجدر الإشارة إلى أن بعض الأحياء الدقيقة تحتاج إلى مواد عضوية تستخدمها لبناء مكونات الخلية وغير قادرة على توفيرها بنفسها، وهذه المواد تسمى عوامل النمو Growth factors، ومن دون هذه المواد العضوية لا تستطيع الأحياء الدقيقة النمو، فهي إذن مواد عضوية معقدة يحتاج إليها

الكائن الحي لتساعد على العمليات الأنزيمية أو لتدخل بوصفها أحد المواد المبدئية Precursor لتخليق مادة عضوية خلوية مهمة لا يستطيع الكائن الحي أن يخلقها من المصادر الكربونية البسيطة؛ لذا يجب إضافتها في المنابت أو البيئات الصناعية بدرجة كافية لاحتياج الكائن الحي، وتقسم عوامل النمو إلى ثلاثة أقسام رئيسة وفقًا لتركيبها ووظيفتها الحيوية بحسب الآتي:

1. الأحماض الأمينية Amino Acids التي تحتاج إليها الخلية بوصفها وحدات لبناء البروتين.

2. البيورينات Purines والبريميدينات Pyrimidines التي تحتاج إليها الخلية بوصفها وحدات لبناء الأحماض النووية.

3. الفيتامينات Vitamins وهي مجموعة مواد عضوية تعمل بوصفها مرافقات لأنزيمات معينة أو بوصفها مراكز لنشاط أنزيمات أخرى.

لذلك يجب أن تحتوي المنابت أو الأوساط الغذائية (البيئات الصناعية) على جميع العناصر المغذية اللازمة لنمو الكائنات الحية الدقيقة، ونظرًا لاختلاف الكائنات الحية الدقيقة من حيث تركيبها وخصائصها الفسيولوجية وتنوعها فإن احتياجاتها الغذائية تختلف اختلافًا كبيرًا على نطاق واسع، ونتيجة لذلك نجد أن الشركات الصناعية والدوائية وعلوم التقنية الحيوية وفرت آلاف البيئات الغذائية الصناعية لتناسب أكبر قدر ممكن من الكائنات الحية الدقيقة، وتغطي معظم المواد والمركبات ذات الأهمية الاقتصادية في حياة الإنسان والمراد إنتاجها صناعيًّا بفعل نشاط الأحياء الدقيقة.

أقسام الأحياء الدقيقة وفقًا لنمط تغذيتها

قسم العلماء والباحثون جميع الكائنات الحية الدقيقة إلى أقسام عدة، معتمدين في ذلك على طبيعة مصدر الطاقة الذي تحصل عليه كل مجموعة أو قسم، وكذلك على طبيعة مصدر الكربون الأساسي، بغض النظر عن مدى الاحتياج أو عدمه إلى عوامل النمو المتخصصة، فالكائنات الحية الدقيقة التي تستعمل الضوء بوصفه مصدرًا للطاقة تسمى الأحياء الممثلة للضوء Phototrophic أما الكائنات الحية التي تستعمل مادة كيماوية بوصفها مصدرًا للطاقة تسمى الأحياء الممثلة للطاقة الكيميائية Chemotrophic.

أما من حيث مصدر الكربون، فإن الكائنات الحية التي تستطيع استعمال غاز ثاني أكسيد الكربون بوصفه مصدرًا وحيدًا أو أساسًا للكربون اللازم لحياتها، فتعرف باسم الأحياء ذاتية التغذية Autotrophic، أما الكائنات الحية التي لا تستطيع استعمال غاز ثاني أكسيد الكربون بوصفه مصدرًا وحيدًا أو أساسًا للكربون، ويلزم لحياتها كربون عضوي، فتعرف باسم الأحياء غير ذاتية التغذية Heterotrophic.

وبناءً على المبدأين الأساسيين السابقين، فقد تمكن علماء الأحياء من تقسيم جميع الكائنات الحية الدقيقة من الناحية الغذائية إلى المجاميع الأربع الآتية:

- **الأحياء ذاتية التغذية ضوئيًّا Photoautotrophic organisms**

وهذه الأحياء الدقيقة هي التي تعتمد على غاز ثاني أكسيد الكربون بوصفه مصدرًا رئيسًا للكربون، أو تستطيع استعمال ثاني أكسيد الكربون بوصفه مصدرًا وحيدًا للكربون وعلى الضوء بوصفه مصدرًا للطاقة، مثل بكتيريا الكبريت الخضراء Green sulfur bacteria والطحالب الخضراء والأشنات وجميعها تحتوي خلاياها على صبغ اليخضور، الذي يمكنها من استغلال الطاقة الضوئية وتحويلها إلى طاقة كيميائية كامنة في خلاياها تستغل لحرق المركبات في أثناء عملية التنفس. وهذا النوع من الكائنات الحية الدقيقة ثبت أنه يستخدم المواد اللاعضوية بوصفها مانحة للهيدروجين Hydrogen donor، وهذا الهيدروجين الناتج يستغل في اختزال ثاني أكسيد الكربون وتحويله إلى المركب العضوي CH2O. وفي المقابل نجد أن النباتات الخضراء تقوم بهذه العملية مستخدمة الماء بوصفه مانحًا للهيدروجين، وليس المواد اللاعضوية، وبذلك يتصاعد غاز الأوكسجين الأساسي في عملية التنفس وحرق المواد العضوية.

- **الأحياء ذاتية التغذية كيميائيًّا Chemoautotrophic organisms**

وهي تلك الأحياء الدقيقة التي تعتمد على غاز ثاني أكسيد الكربون بوصفه مصدرًا رئيسًا للكربون وعلى الطاقة الناتجة من التفاعلات الكيميائية بوصفها مصدرًا للطاقة. وهذه الكائنات تنمو في الظلام على وسط غذائي به أملاح معدنية وخالٍ من المواد العضوية، مثل البكتيريا Thiobacillus التي تؤكسد الكبريت وغيرها من الكائنات الحية الدقيقة التي تعتمد على تفاعلات الأكسدة لأملاح النيتريت Nitrobacter، والأمونيا Nitrosomonas، والحديدوز Gallionella، وتستخدمها بوصفها مصدرًا للطاقة.

- **الأحياء غير ذاتية التغذية ضوئيًّا Photoheterotrophic organisms**

هذا النوع من الأحياء الدقيقة يعتمد على المركبات العضوية بوصفها مصدرًا للكربون وعلى الضوء بوصفه مصدرًا للطاقة، مثل البكتيريا القرمزية غير الكبريتية Purple nonsulfur bacteria فهذا النوع من الكائنات الحية الدقيقة تنمو في الظلام، وتتغذى على بيئات غذائية بها مواد عضوية، وتقوم بتثبيت غاز ثاني أكسيد الكربون في الضوء.

- **الأحياء غير ذاتية التغذية كيميائيًّا Chemoheterotrophic organisms**

أما هذا النوع من الأحياء الدقيقة فيعتمد على المركبات العضوية بوصفها مصدرًا للكربون وعلى الطاقة الناتجة من التفاعلات الكيميائية بوصفها مصدرًا للطاقة، وتشمل هذه المجموعة معظم

البكتيريا وجميع الفطريات، مثل Azotobacter spp. وبكتيريا العقد الجذرية Rhizobium spp. وغالبًا ما تعتمد هذه الأحياء الدقيقة على المركبات العضوية في الأوساط الغذائية بوصفها مصدرًا للطاقة والكربون معًا، ومنها ما يعيش على مواد عضوية لكائنات ميتة، وتسمى مترممة Saprophytes وهي عادة لا تسبب أمراضًا؛ لأن البقايا العضوية التي تتغذى عليها ميتة أصلًا. والبعض الآخر منها تعيش متطفلة Parasites على أنسجة الكائنات الحية الأخرى، ومن ثم ينتج عنها أعراض مرضية للعائل الذي تتطفل عليه.

ومن الجدير بالذكر أن هناك نوعًا من التغذية معروفًا لدى بعض الكائنات الحية الدقيقة يسمى Mixotrophic ويقصد به التغذية المختلطة، ويطلق على مجموعة من الكائنات الحية الدقيقة لديها القدرة على استعمال مواد عضوية أو غير عضوية بوصفها مصدرًا للطاقة أو بوصفها مصدرًا للكربون، فهذه الكائنات الحية الدقيقة في الأصل تكون ممثلة للضوء Photosynthetic، وتستطيع النمو والتكاثر في ظل وجود الضوء، وتستعمله بوصفه مصدرًا للطاقة لإتمام العمليات الحيوية داخل خلايا الكائن الحي. وفي الوقت نفسه تستطيع هذه الكائنات الحية الدقيقة ذات التغذية المختلطة أن تنمو وتعيش وتتكاثر حتى في غياب الضوء عن البيئة الغذائية التي تعيش فيها، وبمعنى آخر هذا النوع من الكائنات الحية الدقيقة مختلط التغذية لديه قدرات تركيبية وخصائص وظيفية تمكنه من التأقلم والتكيف مع البيئة التي يعيش فيها والاستفادة من المتاح من المواد الغذائية في بيئته المحيطة به، دون أن تتأثر أنشطته الحيوية من تكاثر ونمو وغيرها بغياب نوع معين من مصادر التغذية.

التركيب الكيميائي لخلايا الكائنات الحية الدقيقة

The Chemical compound of Microbial Cells

يمكن القول بشكل عام: إن خلايا جميع الكائنات الحية تتشابه في مكوناتها الكيميائية الأساسية، وهذه المكونات الكثيرة التي تشترك بنسب متفاوتة لتشكل مركبات الخلية الحية أو ما يعرف بالجزيئات العملاقة Macromolecules. ويعود الاختلاف في الوظائف والخصائص الملحوظ بين خلايا وأنسجة الكائنات الحية الدقيقة إلى مركبات الخلية وصفاتها البنائية. فالمركبات الكيميائية على الرغم من أنها عديمة الحياة، لكنها تشكل مجتمعة أساس المادة الحية في خلايا الكائنات الحية الدقيقة المتنوعة، وتشير الدراسات التحليلية في مجال علم الكيمياء الحيوية Biochemistry إلى أن خلايا الكائنات الحية الدقيقة تحتوي على نحو ثلاثين عنصرًا كيميائيًّا موزعة على ثلاث مجموعات هي ما يأتي:

- **المجموعة الأولى:** تشكل عناصر هذه المجموعة ما يقرب من 94% من وزن المادة الحية في خلايا الكائنات الحية، وتشمل العناصر الثلاثة الرئيسة المميزة للمركبات العضوية، وهي الكربون C، والأوكسجين O، والهيدروجين H.

- المجموعة الثانية: تسمى عناصر هذه المجموعة العناصر الكبرى Macroelements وتشمل ستة عناصر هي النيتروجين N، والفسفور P، والبوتاسيوم K، والكالسيوم Ca، والكبريت S، والمغنيسيوم Mg. وقد وُجِد أن تركيز هذه العناصر يتراوح بين0.1- 5% من المادة الحية.

- المجموعة الثالثة: توجد عناصر هذه المجموعة بتركيزات ضئيلة جدًّا في خلايا الكائنات الحية الدقيقة، ويصل عددها إلى عشرين عنصرًا، وتسمى العناصر الصغرى Microelements. وهذه العناصر تؤدي دورًا مهمًّا في حياة الكائنات الحية الدقيقة على الرغم من وجودها بتركيز ضئيل يصل إلى حد الندرة، ونقصها أو غيابها قد يؤدي إلى هلاك أو موت خلايا الكائن الحي، ومن عناصر هذه المجموعة، الحديد Fe، والألمنيوم Al، والصوديوم Na، والموليبدنم Mo،

والبورون B، والكلور Cl، والزنك Zn، والسليكون Si، والمنجنيز Mn، والكوبلت Co، والنحاس Cu، والنيكل Ni، واليود I.

لذا نجد أن المركبات المؤلفة للمادة الحية لخلايا جميع الكائنات الحية الدقيقة تتكون من هذه العناصر الكيميائية مجتمعة في المجاميع الثلاث، ويمكن تقسيم مركبات المادة الحية إلى قسمين رئيسين هما:

- مركبات لا عضوية An organic compounds، تضم الماء والأملاح المعدنية.

حيث يُعدّ الماء المكون الأساسي لبروتوبلازم الخلايا الحية النشطة، إذ تصل نسبته إلى 90% من وزنها الكلي، وهو يُعدّ من أهم محتويات الخلية من الناحية الكمية، وعنصر أساسي من عناصر تغذية الكائنات الحية الدقيقة، وإذا ما انخفضت نسبة الماء في بروتوبلازم خلايا الكائنات الحية الدقيقة عن حد معين، فإن الكائن الحي يموت أو يدخل في مرحلة من الحياة البطيئة، ويؤدي الماء دورًا مهمًّا في حياة الخلية الحية، فهو يحافظ على البنية الغروية للسيتوبلازم، ويقوم بدور دعامي للخلايا، علاوة على الدور الذي يقوم به بوصفه وسطًا مذيبًا للمواد والمركبات التي يحتاج إليها الكائن الحي في تغذيته.

ومن جهة أخرى توجد الأملاح في خلايا الكائنات الحية الدقيقة بنسب مختلفة تصل عند بعض الفطريات إلى 5.5%، وتصل إلى 7.2% من الوزن الجاف لبعض الطحالب، وتدخل بعض الأملاح المعدنية في النشاط الحيوي والوظيفي للمادة الحية في خلايا الكائنات الحية الدقيقة، كما هو الحال بالنسبة إلى الفوسفات PO4، والكبريتات SO4، والنترات NO3، وأملاحها. وهناك كربونات الكالسيوم وكبريتات الكالسيوم وأكزالات الكالسيوم التي تشكل بلورات داخل فجوات خلايا بعض الطحالب، وأملاح البوتاسيوم كيود وبروم البوتاسيوم اللذين يُستخلَصان من رماد بعض الطحالب البحرية.

- مركبات عضوية Organic compounds، تشمل الكربوهيدرات، والدهون، والبروتينات، والأحماض النووية، والفيتامينات، والأنزيمات.

سوف أتناول كلًّا من هذه المركبات بشيء من التفصيل؛ لأهميتها ودورها في إنتاج الطاقة والأنظمة الحية Energy and Living systems داخل خلايا الكائنات الحية الدقيقة.

الكربوهيدرات Carbohydrates

تتكون الكربوهيدرات (السكريات) من ثلاثة عناصر رئيسة هي الكربون، والهيدروجين، والأوكسجين، وتدخل الكربوهيدرات في تركيب الخلايا والأنسجة لجميع الكائنات الحية الدقيقة (Hugenschmidt et. al. 2010, Juillard et. al. 1995). وتضم مجموعة المركبات العضوية التي تحتوي على مجموعة الدهيد أو مجموعة كيتونية، وكذلك على عدد من مجمعات الهيدروكسيل، ويكون عدد ذرات الهيدروجين فيها ضعف عدد ذرات الأوكسجين، وتأخذ الصيغة البنائية (CH2O) للكربوهيدرات وظيفتين مهمتين: وظيفة غذائية حيث تستخدم بوصفها مصدرًا أساسيًّا للأكسدة وإنتاج الطاقة اللازمة للتفاعلات البيوكيميائية، ووظيفة أخرى تركيبية في بنية الهياكل الخلوية وتحت الخلوية مثل الجدار الخلوي وغيره من عناصر الوقاية والدعامة. وتنقسم السكريات إلى ثلاثة مجاميع رئيسة هي: السكريات البسيطة (الأحادية) Monosaccharides والسكريات المعقدة قليلة التعدد Oligosaccharides والسكريات المعقدة كثيرة التعدد Polysaccharides.

1. تُعدّ السكريات الأحادية مشتقات لمركبات متعددة الوظيفة الكحولية، وهي تذوب في الماء، ولها طعم حلو. وكيميائيًّا تُعدّ مركبات ألدهيدية متعددة الهيدروكسيل، أو مركبات كيتونية متعددة الهيدروكسيل. وعليه، فإن جميع السكريات الأحادية إما أن تكون ألدهيدية أو كيتونية، ومن أمثلتها الجلوكوز Glucose، والفركتوز Fructose، والجالاكتوز Galactose، والرايبوز Ribose.

2. تضم السكريات المعقدة قليلة التعدد المركبات السكرية التي تحتوي في تركيب جزيئاتها على عدد محدود من السكريات الأحادية يتراوح بين 2-10 جزيئات سكرية أحادية، وتشمل السكروز Sucrose، والمالتوز Maltose، واللاكتوز Lactose، والسليوبيوز Cellobiose.

3. السكريات المعقدة كثيرة التعدد هي بوليمرات للسكريات الأحادية، وتتكون من تجمع أكثر من عشرة جزيئات من السكريات الأحادية؛ ولذا فهي ذات وزن جزيئي كبير، وتقسم إلى سكريات متجانسة تتألف من جزيئات نوع واحد من السكريات الأحادية مثل النشا Starch، والجليكوجين Glycogen، والسليلوز Cellulose، وسكريات غير متجانسة مثل الهيبارين Heparin، والسكريات المخاطية، والسكريات الببتيدية Peptidoglycans، والكيتين Chitin.

الدهون Lipids

تتكون الدهون من الكربون، والهيدروجين، والأوكسجين، وتشمل مجموعة واسعة ومختلفة من المركبات الإستيرية الطبيعية غير المنحلة في الماء، وتذوب في مركبات عضوية خاصة تسمى

محللات الدهون، وتدخل الدهون في تركيب بروتوبلازم الخلايا والجدر الخلوية لبعض الكائنات الحية الدقيقة مثل البكتيريا وغيرها، وتؤدي الدهون دورًا مهمًّا في عمليات الهدم وإمداد الكائنات الحية الدقيقة بالطاقة، فتحرر عند أكسدتها الكاملة كمية كبيرة من الطاقة تفوق تلك الناتجة عن أكسدة أوزان مماثلة من الكربوهيدرات أو البروتينات.

وتقسم الدهون اعتمادًا على بنيتها الكيميائية وخواصها الفيزيائية والتفاعلية إلى الأقسام الثلاثة الآتية:

1. الدهون البسيطة Simple lipids، وتضم كلًّا من الدهون الحقيقية Fats (الجليسريدات الثلاثية Triglycerides) والشموع Waxes. وتتألف من أسترات الأحماض الدهنية Fatty acids مع كحول الجليسيرول Glycerol أو مع مركبات كحولية أخرى.

2. الدهون المعقدة Complex lipids، وتشمل الدهون الفسفورية Phospholipids، والدهون السكرية Glycolipids، والدهون البروتينية Lipoproteins؛ لذا فهذه المجموعة تضم عددًا كبيرًا من المركبات واسعة الانتشار التي تدخل في تركيب كثير من خلايا الكائنات الحية الدقيقة.

3. الستيروئيدات Steroids، وهذه مواد دهنية غير قابلة للتصبن تؤلف مجموعة كبيرة من المواد الدهنية الواسعة الانتشار، وهي عبارة عن أسترات الأحماض الدهنية مع كحولات معقدة متعددة الحلقات تدعى ستيرينات Sterins أو ستيريدات Sterids. ومن الجدير بالذكر أن الكائنات الحية حقيقية النواة تصنع الستيروئيدات، إلا أن الكائنات الحية الدقيقة بدائية النواة كالبكتيريا والسيانوبكتيريا ليس لها القدرة على ذلك.

البروتينات Proteins

البروتينات جزيئات كبيرة جدًّا تتكون من اتحاد جزيئات صغيرة هي الأحماض الأمينية Amino acids، التي تُعدّ وحدات البناء في البروتينات، وتعود تسمية البروتينات Proteins إلى الكلمة اليونانية Protos التي تعني (الأول) أو (المهم) وهكذا فقد أعطي لها الدرجة الأولى من الناحية الحيوية من بين المركبات الأخرى المكونة للمادة الحية في خلايا جميع الكائنات (Morales et. al. 2010).

وتُعدّ البروتينات من المركبات المهمة المشتركة لدى جميع الكائنات الحية الدقيقة، فهي تقوم بدور مهم في تكوين البنية الخلوية، وفي الربط الحيوي والوسائط البروتوبلازمية، وفي تنظيم عمليات الأيض الخلوي. وكيميائيًّا تعرف بأنها مركبات عضوية نيتروجينية ذات وزن جزيئي مرتفع يتراوح من بضعة آلاف إلى مليون وأكثر.

وتتكون البروتينات من الكربون، والهيدروجين، والأوكسجين، والنيتروجين، وبعضها قد يحتوي على الكبريت، وتدخل هذه العناصر بنسب مئوية محددة وثابتة للنوع الواحد من البروتينات في

تركيب الجزيئات البروتينية بحسب الجدول (1-4) الآتي:

الجدول (1-4): النسب المئوية للعناصر الكيميائية في الجزيئات البروتينية.

العنصر Element	النسبة المئوية
الكربون Carbon	% 55 - 50
الأوكسجين Oxygen	% 23 - 20
النيتروجين Nitrogen	% 18 - 15
الهيدروجين Hydrogen	% 8 - 6
الكبريت Sulfur	% 4 - 0

وبشكل عام يتم تقسيم البروتينات في جميع خلايا الكائنات الحية الدقيقة إلى ثلاث مجموعات رئيسة كبيرة هي:

1. **الأحماض الأمينية Amino acids**، وهي أبسط وحدة بنائية أساسية للبروتينات، وهي قابلة للتبلور ومنحلة في الماء بنسب تختلف من حمض لآخر، وتُعدّ الأحماض الأمينية أيونات مشحونة كهربائيًّا، ولها القدرة على التحرك في المجال الكهربائي، ويعرف حاليًّا أكثر من ثمانين حمضًا أمينيًّا توجد بشكل حر أو تدخل في تكوين المركبات المختلفة، أما في تركيب البروتينات الطبيعية فلا يعرف سوى عشرين حمضًا أمينيًّا، وحمضين أميديين، وتصنف الأحماض الأمينية إلى ثلاث فئات أولها: تكون ذات سلاسل مفتوحة (اللادورية) Aliphatic مثل الجلايسين Glycine، والآلانين Alanine، والفالين Valine، واللوسين Leucine، والسيرين Serine، والتريونين Threonine، والجلوتاميك Glutamic، والأسبراجين Asparigine، والأرجنين Arginine، والسيستين Cystine. والفئة الثانية حلقية (دورية) Aromatic مثل الفينيلانين Phenylani ne، والتيروزين Tyrosine، والثالثة تسمى الأحماض الأمينية المختلطة Heterocyclic مثل التربتوفان Tryptophan، والهيستيدين Histidine.

2. **الببتيدات Peptides**، تتشكل الببتيدات من الأحماض الأمينية الحاوية على مجموعة أمينية وأخرى كربوكسيلية في آن واحد، وتكون آلية تشكيلها عبر عملية تكاثف متعدد يتم بين المجموعة الأمينية لأحد الأحماض من جهة والمجموعة الكربوكسيلية لحمض أميني آخر من جهة ثانية، وإن الرابطة المتشكلة بين هاتين المجموعتين الوظيفيتين هي ما تدعى الرابطة الببتيدية Peptide

bond. وهكذا يسمى المركب الناتج عن تكاثف حمضين أمينيين الببتيد الثنائي، وكلما زاد عدد الأحماض في السلسلة حصلنا على مركبات ذات وزن جزيئي مرتفع تسمى الببتيدات المتعددة Polypeptides. ويعرف حاليًّا أكثر من 120 ببتيدًا مختلفًا تم الحصول عليها من مصادر بيولوجية مختلفة، وهي معروفة البنية ومدروسة الخواص والدور الحيوي الذي تقوم به داخل الخلايا الحية، ويقدر الباحثون أن عدد الببتيدات المستقلة الموجودة في الكائنات الحية يزيد على 1000 ببتيد مختلف، تؤخذ عادة الأحرف الثلاثة الأولى من أسماء الأحماض الأمينية للدلالة على اسم الببتيد أو الجزيء البروتيني.

3. **البروتينات Proteins**، تصنف إلى بروتينات بسيطة تتركب من أحماض أمينية فقط، وبروتينات معقدة ترتبط بها مركبات أخرى كالأحماض النووية، والسكريات، والدهون، وحمض الفسفور، وغيرها، وتنتمي معظم الأنزيمات إلى البروتينات المعقدة، ومعلوم أن الأنزيمات تؤدي دورًا حيويًّا مهمًّا للغاية في السيطرة والتوجيه لمجمل النشاطات والتحولات البيوكيميائية في خلايا الكائنات الحية الدقيقة، وإن الروابط الببتيدية هي أساس بنية الجزيئات البروتينية التي تتكون من سلاسل ببتيدية متعددة طويلة أو قصيرة؛ لذا نجد أن الروابط التي توجد بين الأحماض الأمينية المكونة لجزيء البروتين هي الروابط الببتيدية (-CO-NH-) نفسها الموجودة بين الأحماض الأمينية للببتيدات، فهناك أهمية كبرى للببتيدات المتعددة بوصفها أساسًا هيكليًّا للجزيئات البروتينية. وأما الروابط التي توجد بين السلاسل الببتيدية المتجاورة فيمكن أن تكون روابط هيدروجينية أو روابط تساهمية أو روابط أيونية أو روابط كارهة للماء، وتختلف مستويات التنظيم التركيبي للبروتينات من سلسلة إلى شكل حلزوني إلى كرة مسطحة إلى أكثر من وحدة ترتبط مع بعضها مشكلة تركيبًا متداخلًا، وتشترك البروتينات في جميع التفاعلات والخواص التي تتمتع بها الأحماض الأمينية؛ لأن الخواص التي تتميز بها البروتينات تعود إلى الطبيعة الكيميائية لجذور الأحماض الأمينية المكونة لها، ومن أهم الخواص الفيزيائية والكيميائية للبروتينات، الحالة الغروية والوزن الجزيئي المرتفع وقابليتها للذوبان في الماء وفي المحاليل الملحية وبعض المذيبات العضوية.

الأحماض النووية Nucleic Acids

تتركب الأحماض النووية من وحدات بناء تعرف بالنيكليوتيدات Nucleotides، فتوصف بأنها بوليمرات حيوية Biopolymers ذات سلسلة طويلة من النيوكليوتيدات؛ ولذا تُعدّ الأحماض النووية نيوكليوتيدات متعددة Polynucleotides. وإن للأحماض النووية دورًا أساسيًّا بارزًا في نقل الصفات الوراثية من جيل إلى آخر لدى جميع الكائنات الحية، حيث تدخل الأحماض النووية في تركيب أنوية خلايا الكائنات الحية الدقيقة والراقية بلا استثناء، وتدخل أيضًا في تركيب السيتوبلازم وكثير من العضيات الدقيقة كالبلاستيدات، والميتوكوندريا، وقد أثبت الباحثون قيام الأحماض النووية بدور مهم في عمليات البناء الحيوي للمركبات المختلفة الداخلة في عضوية جميع الكائنات الحية الدقيقة (Brüssow 2001, Al-Falih & Wainwright 1995).

ويوجد نوعان مختلفان من الأحماض النووية: أولهما الحمض النووي الريبوزي Ribonucleic acid ويرمز له اختصارًا بالرمز RNA، ويوجد بشكل رئيس في السيتوبلازم، وثانيهما الحمض النووي منقوص الأوكسجين Deoxyribonucleic acid ويرمز له بالرمز DNA، وهذا النوع يتمركز بشكل أساسي في أنوية خلايا الكائنات الحية، ويوجد في كل من البلاستيدات، والميتوكوندريا.

يمكن إيجاز أوجه الشبه والاختلاف بين جزيئي الــ DNA والــ RNA بالجدول (1-5) الآتي:

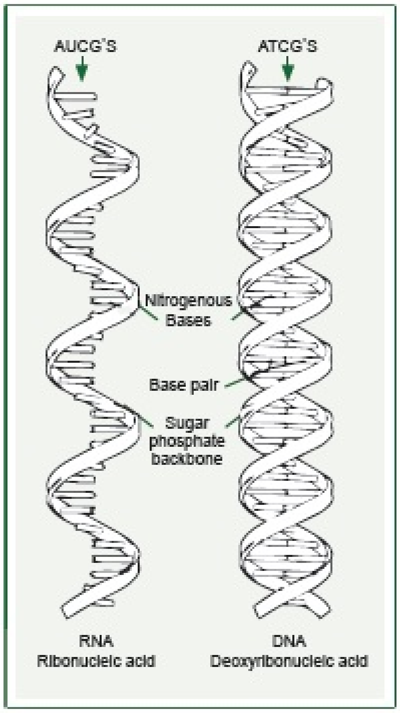
الجدول (1-5): أوجه الشبه والاختلاف بين جزيئي الــ DNA والــ RNA.

المركب الكيميائي	الأحماض النووية	
	DNA	RNA
الأسس البيورينية Purines	أدنين Adenine جوانين Guanine	أدنين Adenine جوانين Guanine
الأسس البيريميدينية Pyrimidines	سيتوسين Cytosine ثيمين Thymine	سيتوسين Cytosine يوراسيل Uracil
السكريات Carbohydrates	الريبوز منقوص الأوكسجين وأحيانًا الجلوكوز Glucose	الرايبوز Ribose
المركبات اللاعضوية	حمض الفسفور	حمض الفسفور

وفيما يتعلق ببناء جزيء الــ DNA فقد اكتشف العالمان واتسون وكريك Watson & Crick في عام 1953م أن جزيء الــ DNA يتألف من سلسلتين بيكليوتيديتين متعددتين ملتفتين حلزونيًّا على بعضهما، تكون فيهما السلسلة السكرية الفسفورية إلى الخارج، وتقابلها من الداخل الأسس (القواعد) البيورينية والبيريميدينية، ويتم ارتباط السلسلتين مع بعضهما عن طريق الروابط الهيدروجينية التي تنشأ بين القواعد النيتروجينية المتقابلة في السلسلتين، وأما بالنسبة إلى ترتيب المجموعات النيكليوتيدية في كل من سلسلتي جزيء الــ DNA فهو محدد ودقيق للغاية، ويُعدّ بحد ذاته البنية الأولية للجزيء نفسه.

ويتم ارتباط النيكليوتيدات في جزيء الــ RNA بطريقة الارتباط نفسها في جزيء الــ DNA، وذلك عبر مجموعات الفوسفات وتشكيل رابطتين إستيريتين Diester تربطان ذرتي الكربون الثالثة والخامسة C3 وC5 التابعتين لجزيئي سكر الرايبوز الموجودين في نيكليوتيدتين متجاورتين،

ويتألف جزيء الــ RNA من سلسلة نيكليوتيدية متعددة واحدة ليس لها شكل فراغي واحد، بل يتحدد شكلها بحسب شروط الوسط الموجودة فيه والعلاقات المتبادلة بين مكونات السلسلة نفسها، ففي الوسط الملحي تكون حلزونية غير منتظمة، ملتوية وملتفة على بعضها، بحيث تأخذ في النهاية شكلًا كرويًّا أو متطاولًا كما في الشكل (1-1).


AUCG'S
ATCG'S
Nitrogenous Bases
Base pair
Sugar phosphate backbone
RNA
Ribonucleic acid
DNA
Deoxyribonucleic acid

الشكل (1-1): مقارنة بين بناء جزيء DNA وRNA.

من الجدير بالذكر أن هناك أنواعًا عدة أو أشكالًا من الحمض النووي RNA هي: الحمض النووي الريبوزي الرسول (Messenger RNA) m-RNA، والحمض النووي الريبوزي الناقل (Transfer RNA) t-RNA، والحمض النووي الريبوزي الريبوزومي ((Ribosomal RNA r-RNA، والحمض النووي الريبوزي الفيروسي، وهذا النوع الرابع يوجد في الجزيئات الفيروسية، ويستخرج منها باستعمال مذيبات عضوية خاصة.

إنتاج الطاقة The Energy

يتم إنتاج الطاقة الكامنة أو تحريرها من المواد والمركبات المختلفة في خلايا الكائنات الحية الدقيقة خلال عملية فسيولوجية تسمى الأيض Metabolism تتم في عضية حية تعرف بالميتوكوندريا، وتعرف عملية الأيض بأنها العملية التي يتم بواسطتها تبادل المواد بين العضية الحية والوسط الخارجي، وتشمل جميع التحولات البيوكيميائية التي تتم في آن واحد داخل العضية الحية من بناء

Anabolism وهدم Catabolism، والطاقة المتحررة في أثناء عملية الأيض تستخدم في بناء مكونات خلوية أخرى؛ أي يتم خلال عملية الهدم تحويل الطاقة الكيميائية الكامنة في المواد إلى طاقة حرارية، ثم إلى طاقة كامنة من جديد خلال عملية البناء، وهذا ما يدعى دورة الطاقة Energy cycle.

وعندما تتكسر الروابط الكيميائية الموجودة في بعض المركبات، تتغير الجزيئات في الحجم، وتحل الطاقة الكامنة للمواد الناتجة محل الطاقة الكامنة للمواد المتفاعلة، ويُعدّ الفرق بين هذين المستويين من الطاقة معبّرًا عن الطاقة المتحررة أو المستهلكة في أثناء سير التفاعل، فالتفاعلات الكيميائية عامة إما أن تكون منتجة للحرارة، فتسمىExothermic reactions، أو تكون مستهلكة للحرارة فتسمى Endothermic reactions.

وتميل جميع النظم الفيزيائية والكيميائية في أثناء سيرها في التفاعلات إلى اتخاذ الترتيبات الجزيئية الأكثر عشوائية، ونتيجة لذلك يرتبط جزء من التغير في الطاقة الكامنة بهذا التغير في الترتيب أو الانتظام، وهذا ما يسمى عامل العشوائية أو الإنتروبي Entropy، ويرمز له بالحرف S، فهو يمثل ذلك الجزء من الطاقة غير المتاح لأداء عمل ما ويرمز له بالحرف (Q) مقسومًا على درجة الحرارة المطلقة، ويرمز لها بالحرف (T) بحسب المعادلة الآتية: $S = Q / T$.

ويُعدّ عامل العشوائية مقياسًا لدرجة انتظام أو عشوائية نظام ما، بمعنى أن النظام الذي يمكن أن يوجد في صور متعددة يكون أكثر عشوائية مثل السوائل والغازات، وبذلك تكون قيمة الإنتروبي أعلى، في حين أن النظام الذي يوجد في صور أو أنماط أقل عددًا يكون أقل عشوائية مثل الأجسام الصلبة والبروتينات، وبذلك تكون قيمة الإنتروبي أقل، ويمثل الإنتروبي حرية حركة الجزيئات داخل المادة أو النظام، وكذلك حركة الذرات التي يتألف منها الجزيء، وكلما كانت حرية الحركة أكبر، كانت العشوائية أعظم وكانت الطاقة المرتبطة بالإنتروبي أوفر. وهكذا تزداد طاقة الإنتروبي مع ارتفاع درجة الحرارة (Buckle & Kartadarma 1990, Adonizio et. al. 2008).

وحيث يصعب أو يندر معرفة تركيز كل من المواد المتفاعلة والمواد الناتجة في النظم الحية لخلايا الكائنات الحية الدقيقة، فإنه يصعب هنا تطبيق قيم الطاقة الحرة $F\Delta$ إذ إن هذه الأخيرة تختلف باختلاف تركيز المواد المتفاعلة، ويضاف لما تقدم ضرورة قيام العمليات تحت ظروف تسمح بأن تكون عكسية، وذلك بحسب الأسس العامة للديناميكا الحرارية Thermodynamic التي تعتمد عليها قيم الطاقة الحرة $F\Delta$ نفسها، فتتعذر قابلية مثل هذه التفاعلات للانعكاس؛ لأن النظم الحية في خلايا الكائنات الحية الدقيقة تطلق وتفرز مواد عدة خلال استمرار ما يجري فيها من عمليات وتفاعلات كيميائية وحيوية متنوعة، وهذه المواد المفرزة يستبعد تأثيرها في سير التفاعلات الجارية.

وتميل التفاعلات العكسية نحو حالة الاتزان Equilibrium التي يكون تغير الطاقة الحرة FΔ عندها معدومًا (أي مساويًا للصفر)، حيث لا يتم أي تحول بين المواد المتفاعلة والناتجة، وهذا لا يحدث في خلايا الكائنات الحية التي يلاحظ أنها تمتاز بأن المواد الناتجة من التفاعلات أو العمليات الحيوية لديها تدخل في سلسلة من المسارات Pathways

أو التفاعلات الأيضية، بشكل يكون فيه واحد أو أكثر من نواتج التفاعل الأول ضمن المواد المتفاعلة في التفاعل الذي يليه، وهكذا دواليك، بحيث يحول دون استبعاد النواتج أولًا بأول، وذلك يمنع نشوء حالة الاتزان.

ويحدث في كثير من العمليات الحيوية في خلايا الكائنات الحية الدقيقة ألا تعقبها تفاعلات تزيل النواتج، أو تدخلها في تفاعلات أخرى تالية، بل قد تتراكم نواتجها النهائية في الخلية الحية بكميات كبيرة، كما هو الحال في السكريات المتعددة Polysaccharides، والبروتينات Proteins، والدهون Lipids. وهذا يعني أن تراكم مثل هذه النواتج البوليمرية قد تم في الخلية بآلية أخرى غير آلية التكاثف أو التكاثف المتعدد Polycondensation

أو البلمرة Polymerization (حيث تكون FΔ موجبة)، وبشكل يكون فيه التغير الكلي في طاقتها الحرة ذا قيمة سالبة لكي يستطيع الاستمرار تلقائيًّا.

ونظرًا لأن خلايا الكائنات الحية الدقيقة تعيش وتعمل في الغالب تحت ظروف ثابتة من الضغط ودرجة الحرارة؛ أي إن أية خلية حية تكون جميع أجزائها في درجة حرارة واحدة وتحت ضغط جوي واحد، فإن أنظمة خلايا الكائنات الحية الدقيقة تختلف عن غيرها من النظم غير الحية في نمط آليات تحول الطاقة. وبناءً على ذلك، فإن خلايا الكائنات الحية الدقيقة لا تستطيع استخدام الحرارة بوصفها مصدرًا للطاقة؛ لأن الطاقة الحرارية لا يمكن أن تؤدي شغلًا تحت ظروف ضغط ثابتة إلا بمرورها عبر منحدر حراري Temperature gradient.

فالخلايا الحية إذًا تُعدّ طرازًا فريدًا مختلفًا تمامًا عن الآليات الحرارية أو الكهربائية المألوفة، فهي آلية كيميائية تعمل عند درجة حرارة ثابتة، وتحول الطاقة التي تحصل عليها من بيئتها التي تعيش فيها إلى طاقة كيميائية، ويتوقف تشغيل هذه الآلية الحيوية في خلايا الكائنات الحية الدقيقة على منحدرات طاقة كيميائية Chemical energy gradients، ويتطلب تغير الطاقة الكيميائية حدوث تغير مصاحب في التركيب الجزيئي الذي يترافق بإعادة توزيع وترتيب إلكترونات التكافؤ، علمًا أن إلكترونات التكافؤ تأخذ في العضيات الحية داخل خلايا الكائنات الحية الدقيقة المتنوعة صورة أو مجرى انسياب هابط للإلكترونات عبر منحدر تأكسدي اختزالي Oxidation-reduction gradient، وعلى مراحل عدة، وبواسطة سلسلة من الأنزيمات الخاصة بكل مرحلة.

الفصل الثاني

الأحياء الدقيقة في بيئاتها الطبيعية

Microorganisms in their natural habitats

- الأحياء الدقيقة في بيئاتها الطلبيعية.
- الأحياء الدقيقة في الغلاف الجوي.
- الأحياء الدقيقة في البيئات المائية.
- الأحياء الدقيقة في التربة.

الفصل الثاني

الأحياء الدقيقة في بيئاتها الطبيعية

Microorganisms in their natural habitats

تنتشر الأحياء الدقيقة من بكتيريا وفطريات وطحالب في جميع البيئات على سطح الأرض، وعلى الرغم من تنوع البيئات الطبيعية واختلاف الأنظمة البيئية، إلا أن الأحياء الدقيقة تعمرها وتتنوع بتنوعها، ويطلق على الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في البيئات الطبيعية اسم الفلورا الدقيقة Micro Flora، ولا شك أن لكل منطقة أو نظام بيئي خصائص معينة يتميز بها عن غيره، بما في ذلك العوامل البيئية وعوامل التربة، إضافة إلى العوامل الحيوية، والكائنات الحية الدقيقة التي تُوجَد في بيئة معينة تكون لديها خصائص فسيولوجية تمكنها من التأقلم والعيش والتكاثر في هذه البيئة دون غيرها، وقدرة أي كائن حي من الأحياء الدقيقة على العيش والنمو في بيئة معينة لا تعني بالضرورة أن لديه الاستعداد على أن ينجح في بيئة أخرى، وبعض الأحياء الدقيقة في المواطن البيئية تكون أصلية Autochthonous؛ أي Indigenous طبيعية، وهذه تعمر المكانة البيئية Niches في النظام البيئي، وبعض آخر من الكائنات الحية الدقيقة تكون دخيلة Allochthonous؛ أي مجلوبة إلى البيئة التي تعيش فيها، وهذه قد تقاوم مدة من الوقت للبقاء في النظام البيئي الذي وصلت إليه، ولكن ينظر إليها على أنها متنقلة، فلا تملأ المكانة البيئية. وغير معروف أن الغلاف الجوي يدعم وجود جماعات مستوطنة من الأحياء الدقيقة، ولكن ينظر إليه على أنه وسط للتشتيت العالمي السريع لأنماط عدة من الكائنات الحية الدقيقة، وهناك تحولات مهمة للأحياء الدقيقة والغازات الأيضية فيما بين الغلاف الجو والغلاف المائي واليابسة، وإن الغلاف المائي واليابسة في المقابل يحتويان على أكبر الجماعات والتنوع للأحياء الدقيقة أصلية المنشأ، وبشكل عام، فإن هذه الجماعات تملك خصائص فسيولوجية للتأقلم جعلتها تعيش وتستوطن البيئات بشكل واسع، وتمارس نشاطاتها الأيضية التي تمدها باحتياجاتها وتمكنها من تدفق الطاقة خلال النظام البيئي وتدوير المواد خلال دورات المعادن بفعل المحللات، وفي الأنظمة البيئية المائية Aquatic ecosystems تُعدّ الأحياء الدقيقة المنتجات الأولية وكذلك المحللات في الوقت نفسه، فعلى سبيل المثال في المياه البحرية نجد أن الأحياء الدقيقة المكونة للبلانكتون يكون لها الدور الحصري تقريبًا في الإنتاج الأولي للمادة العضوية. وأما النباتات الراقية والطحالب الكبيرة فتشارك بشكل ملحوظ في الإنتاج الأولي فقط في المصبات والأماكن المنتشرة على الضفاف، بينما في التربة تقوم الأحياء الدقيقة بدور ثانوي بعد النباتات بوصفها منتجات أولية، وفي المقابل تقوم الأحياء الدقيقة بدور فاعل وأساسي في تحليل المادة العضوية ودورات المعادن في التربة (Atlas and Bartha 1993).

الأحياء الدقيقة في الغلاف الجوي Atmosphere Microorganisms

نظرًا لشدة وقسوة العوامل المناخية Climate factors من درجة حرارة وإشعاع وغيرها وسرعة تقلبها وتحولاتها المتباينة، فيُعدّ الغلاف الجوي بيئة طاردة للكائنات الحية الدقيقة، وعلى الرغم من ذلك يوجد عدد كبير من الأحياء الدقيقة في الطبقة السفلى من الغلاف الجوي التروبوسفير Troposphere. وتشكل التحركات خلال الهواء ممرًّا رئيسًا لتشتيت الأحياء الدقيقة على نطاقات واسعة في طبقات الجو، وبعض الكائنات الحية الدقيقة لديه القدرة على تطوير أو تنمية تكيفات متخصصة تساعده على الحياة والانتشار في الغلاف الجوي. وعلى الرغم من أن الهواء بيئة غير مناسبة لنمو وتكاثر الكائنات الحية الدقيقة، إلا أنه محمل بأنواع متباينة من الكائنات الدقيقة، وتوجد البكتيريا في الهواء محمولة على جزيئات التراب dust، وإضافة إلى البكتيريا يوجد في الهواء الفطريات والخمائر، ويوجد أيضًا حبوب اللقاح، ومعظم أنواع البكتيريا الموجودة بالهواء من الأنواع المترممة التي تؤدي دورًا مهمًّا في صناعات حفظ الأغذية والألبان، وأما الأنواع الأخرى فتسبب تلوثًا للهواء، وينتشر كثير من البكتيريا والفطريات الممرضة في الغلاف الجوي؛ لذا عادة ما تنتشر الأمراض التي تسببها هذه الأحياء الدقيقة المتنوعة عقب هبوب الرياح من الأماكن الموبوءة (Sun et. al. 2004, Taurop 1997, Teusink et. al. 2007).

وتنتمي معظم أنواع البكتيريا الموجودة بالهواء إلى البكتيريا العصوية المكونة للجراثيم Spore-forming bacillus، مثل مجموعة B. subtiles، ونظرًا لقدرة هذه البكتيريا على التجرثم فإنها تستطيع مقاومة الجفاف والظروف البيئية الأخرى، وتوجد أنواع عدة من جنس Saroine وجنس Micrococcus وهذه بكتيريا كروية مترممة وملونة، وعادة يطلق على الكائنات الحية الدقيقة الموجودة بالهواء اسم Air-borne microorganisms، وتنتقل محمولة على جزيئات التراب أو قطرات المياه. وتتوقف كفاءة هذه الجزيئات بما تحمله من كائنات على الظروف الجوية من رطوبة وحرارة وحجم الجزيء الحامل نفسه، وكذلك طبيعة الكائن المحمول وقدرته على مقاومة الظروف البيئية المحيطة.

ويتوقف عدد الكائنات الحية الدقيقة في الهواء على مصدر التربة، فإذا كانت من أرض زراعية خصبة زادت الأعداد والأنواع، وعلى العكس إذا كانت من أرض رملية، ويسبب العطس والكحة زيادة أعداد الكائنات الحية الدقيقة في وسط الهواء المحيط، والهواء فوق المحيطات يحتوي على أعداد ميكروبات أقل من الهواء فوق اليابسة، وفي دراسة للهواء فوق المحيط الأطلنطي على ارتفاع تسعة آلاف قدم وجدت أنواع مختلفة من البكتيريا(Ghosh 1990).

والتحليل البكتيري لكتلة من الهواء يبين مصدرها، فالهواء الاستوائي يحتوي على نسبة عالية من البكتيريا العصوية سالبة جرام والبكتيريا العصوية متعددة الأشكال موجبة جرام، ونسبة أقل من البكتيريا الكروية مكونة الجراثيم، والحال عكس ذلك تمامًا بالنسبة إلى الهواء المداري، حيث يحتوي الهواء في فصل الصيف الجاف على أعداد من البكتيريا أكثر منها في فصل الشتاء، وعند تحليل

الهواء على ارتفاعات مختلفة فوق سطح الأرض وجدت بعض الأنواع من الكائنات الدقيقة على ارتفاع يصل إلى 20 ألف قدم.

ويُعدّ الأوكسجين من الغازات المهمة في الغلاف الجوي لكل صور الحياة تقريبًا؛ لأنه ضروري في عملية التنفس، إلا أن الكائنات الحية الدقيقة تتفاوت في درجة حاجتها لهذا الغاز أو عدم الحاجة إليه إطلاقًا، ويحتوي الهواء الجوي على 20% أكسجين، وعلى ذلك فإن استجابة الأحياء الدقيقة للهواء تختلف اختلافًا كبيرًا من نوع أو جنس لآخر، ويمكن التحكم في نمو كثير من الأحياء الدقيقة بالتحكم في الأوكسجين، وتم توظيف هذه الخاصية في صناعة تعليب الأغذية بواسطة عملية التعقيم التجاري، وتوفر المواقع المؤقتة في الطبقات الدنيا من الغلاف الجوي Troposphere مواطن للأحياء الدقيقة، واحتجاز السحب لكميات من الماء يشجع على نمو الأحياء الدقيقة في الهواء، وكثافة الضوء وتركيزات ثاني أكسيد الكربون في طبقات السحب تُعدّ كافية لدعم وتشجيع نمو الأحياء الدقيقة ذاتية التغذية الضوئية Photoautotrophic microorganisms، والذرات المركزة قد توفر تغذية معدنية للميكروبات في الهواء، وقد يوجد في أجواء المناطق الصناعية تركيزات عالية من المركبات الكيميائية العضوية تشجع على نمو بعض الكائنات الحية الدقيقة غير ذاتية التغذية Heterotrophs microorganisms. وعلاوة على ذلك، فإن الحياة في الهواء غير مستقرة وعمليًّا تبدو غير ذات أهمية، ولا تسترعي انتباهًا أو اهتمامًا كثيرًا من الباحثين (Wistriech & Lechtman 1988, Xiong et. al. 2014, Yokotsuka 1986, Zaccaria et. al. 2017, Zengler 2009).

وتقسم الكائنات الحية الدقيقة تبعًا لحاجتها للأكسجين إلى ثلاث مجموعات:

- **كائنات حية دقيقة هوائية إجباريًّا Microorganisms Obligate aerobic**

هذه المجموعة من الكائنات الحية الدقيقة تتنفس تنفسًا هوائيًّا إجباريًّا، ويُعدّ غاز الأوكسجين محددًا لنموها وأساسيًّا لحياتها؛ أي لا تستطيع هذه الكائنات الحية الدقيقة النمو إلا مع وجود الأوكسجين، ومن أمثلتها معظم الفطريات والطحالب، ومن البكتيريا النوع Bacillus subtilis، ويقتصر وجودها وانتشارها في البيئات الطبيعية المفتوحة جيدة التهوية.

- **كائنات حية لا هوائية إجباريًّا Microorganisms Obligate anaerobic**

هي أحياء دقيقة تتنفس لا هوائيًّا فقط، ولا يمكنها أن تحيا في وجود الأوكسجين، فهي لا تحتاج إلى الأوكسجين مطلقًا في نموها، وإن وجود الأوكسجين في بيئتها يُعدّ سامًّا بالنسبة إلى خلاياها، ويتسبب في موتها، ومن أمثلتها من البكتيريا أنواع الجنس Clostridium، ويقتصر وجودها وانتشارها في البيئات الطبيعية المغلقة Closed system؛ أي عديمة التهوية، مثل أعماق البحار، والرواسب، والطبقات السفلى من التربة.

- **كائنات حية دقيقة اختيارية Facultative aerobic Microorganisms**

هي الكائنات الحية الدقيقة التي تستطيع النمو سواءً كان الأوكسجين موجودًاأو غائبًا، وهذه المجموعة من الأحياء الدقيقة واسعة الانتشار في الطبيعة، ويكثر وجودها في معظم البيئات، ويمثل هذا الطراز أغلبية أنواع البكتيريا، ومنها النوع إنتروكوكس Enterococcus faecalis، وبعض الفطريات والطحالب، وهذه الأنواع من الكائنات الحية الدقيقة تمتلك خصائص فسيولوجية وتركيبية تمكنها من العيش والتكيف مع ظروف بيئية مختلفة ما جعلها ذات مدى واسع من الانتشار في الأنظمة البيئية المختلفة.

ومن الجدير بالذكر أن كثيرًا من الأحياء الدقيقة التي تنمو في الغلاف المائي أو على اليابسة ممكن أن تنتقل إلى الهواء، وتشكل Air-borne microorganisms، فلا توجد في الغلاف الجوي ميكروبات أصلية الموطن والمنشأ، بل تكون الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في الهواء دخيلة Allochthonous؛ أي مجلوبة إلى الغلاف الجوي من بيئات أخرى كانت تعيش فيها.

ويلاحظ أنه خلال عملية الانتشار، فإن ميكروبات التربة والوسط المائي ممكن أن تدخل وتمر خلال الغلاف الجوي قبل أن تلامس بيئات مائية مفضلة أو نظامًا بيئيًّا أرضيًّا، علمًا أن ظاهرة انتشار الأحياء الدقيقة في الغلاف الجوي تضمن استمرارية الحياة لكثير من الميكروبات.

ويتحول بعض الأحياء الدقيقة إلى الغلاف الجوي نتيجة النمو الخضري للخلايا، لكن معظم الميكروبات في الهواء تُوجَد على شكل أبواغ أو جراثيم Spores. وتُعدّ الجراثيم أقل في نشاطاتها الأيضية من الخلايا الخضرية Vegetative cells، وإن الجراثيم عمومًا تُعدّ أقدر على التأقلم والعيش في الغلاف الجوي. وتعرف الجراثيم التي وظيفتها الأساسية الانتشار باسم Xenospores، والكائنات الحية الدقيقة التي تنتج جراثيم تنتشر في الغلاف الجوي هي الفطريات والطحالب وبعض الأوليات وبعض الأجناس البكتيرية، خصوصًا الأكتينوميسيتات والأشنات، ومعلوم أن الفيروسات تكون غير نشيطة في حال وجودها خارج خلايا العائل؛ ولذلك يمكن أن تكون ضمن الأبواغ عندما تُوجَد في الغلاف الجوي.

وتسهم خصائص عدة في قدرة الجراثيم على التنقلات في الغلاف الجوي، أولها انخفاض معدل النشاط الأيضي لديها ما يعني عدم حاجتها إلى غذاء خارجي وماء لتنتج طاقة كافية للعيش لوقت طويل في الغلاف الجوي. وهذا أساسي لبقائها حية في الغلاف الجوي مع ندرة الماء والغذاء، والنجاح في إنتاج الجراثيم يحتاج إلى بيئة مناسبة للنمو، ولا يمكن دعم الأنشطة الأيضية للخلايا الخضرية التي يتطلبها الكائن الحي لتحقيق الإعاشة التامة للخلايا على المدى البعيد في الغلاف الجوي، فبمجرد أن تستخدم الخلايا المواد المحتجزة الداخلية، فإن الخلايا الخضرية في الغلاف الجوي لا تستطيع إنتاج طاقة كافية للقيام بالوظائف السليلوزية الحيوية، وبذلك تموت الخلايا.

وتنتج الجراثيم في الغلاف الجوي بأعداد هائلة، فعلى سبيل المثال وجد أن بعض الفطريات لديها القدرة على إنتاج نحو 1210 جراثيم في كل جسم ثمري واحد في السنة (Verstraete 2007). ونسبة كبيرة من هذه الجراثيم لا تبقى حية في الغلاف الجوي خلال التنقلات حتى تصل إلى البيئة المفضلة للنمو والتكاثر، وعلى الرغم من ذلك، فإن نجاح عدد قليل من الجراثيم يضمن انتشار وحياة الأحياء الدقيقة، وهناك عوامل تأقلم عدة إضافية تزيد من قدرة الجراثيم على الحياة في الغلاف الجوي، فبعض الجراثيم تكون ذات جدار سميك يحميها من الظروف البيئية القاسية وتقلبات الجو، وبعضها الآخر فيه صبغات، وهذا يضيف لها وسيلة حماية من التدمير والضرر عند تعرضها لأشعة الشمس، وما تحويه من الأشعة تحت الحمراء وفوق البنفسجية، إضافة إلى صغر حجمها وكثافتها المنخفضة، وهذه الخصائص تتيح للجراثيم فرصة العيش والبقاء في الغلاف الجوي قبل أن تترسب وتسقط على الأرض، وفي الغالب تكون الجراثيم خفيفة الوزن، وقد تحتوي على فجوات غازية، وتأخذ أشكالًا عدة تساعدها على التنقلات في طبقات الغلاف الجوي.

وتُعدّ عملية تحرر الجراثيم التلقائي في الغلاف الجوي مع تحركات الهواء هي ظاهرة معروفة ومشتهرة لدى الأحياء الدقيقة التي تنتج جراثيم جافة على الغزل الفطري الهوائي، وهذه الأحياء الدقيقة مثل الأكتينوميسيتات وكثير من الفطريات تنقل بعض الجراثيم إلى الأعلى من الأجسام الثمرية الميكروبية بالانتقال الحراري، والبعض الآخر يتحرك بفعل الرياح حركة عمودية وأفقية في جميع الاتجاهات، وبشكل عام، فإن أكبر درجة لتنقلات الجراثيم تكون خلال زيادة سرعة الرياح مع انخفاض نسبة الرطوبة، حيث تُعدّ سرعة الرياح الملامسة لسطوح النباتات عاملًا مهمًا في انتشار الأحياء الدقيقة في الغلاف الجوي، وتنتشر بهذه الطريقة كثير من الفطريات الممرضة للنبات من نبات إلى آخر (ويلسون وآخرون 1989م).

ويُعدّ تعرض الأحياء الدقيقة للإشعاعات ذات الموجات القصيرة مثل الأشعة فوق البنفسجية UV من أهم الأسباب المؤدية إلى موت وفقد كثير من الأحياء الدقيقة في الغلاف الجوي؛ لذا تلجأ كثير من الميكروبات إلى أخذ وسائل دفاعية عدة تمكنها من العيش ولو لأوقات قصيرة في الغلاف الجوي دون أن تتأثر بأشعة الشمس وغيرها من العوامل المهلكة، ومن أبرز وسائل الدفاع لدى ميكروبات الغلاف الجوي Air-borne microorganisms اتحادها مع العوالق والأجسام الدقيقة المنتشرة في الهواء، أو امتلاكها للصبغات التي تحميها من ضرر الأشعة، فالبكتيريا والفطريات التي تملك صبغات تكون أقل ضررًا وأكثر مقاومة من تلك الخالية من الصبغات التي تموت عند تعرضها للأشعة فوق البنفسجية Ultra violet.

الأحياء الدقيقة في البيئات المائية Aquatic Microorganisms

يغطي الماء (70.8%) من سطح الكرة الأرضية، ويوجد بالماء كثير من أنواع الكائنات الحية الدقيقة من طحالب، وأوليات، وفطريات مائية، وبكتيريا... إلخ. ومصدر هذه الكائنات الحية الدقيقة

أما الهواء أو التربة أو الفضلات العضوية، وتعتمد هذه الكائنات في تغذيتها على المواد الموجودة بالماء مثل الحديد في حالة بكتيريا الحديد، وكبريتيد الهيدروجين في حالة الكبريت، والفضلات العضوية في حالة الفطريات والبكتيريا المترممة، وقد يحتوي الماء على بعض المواد السامة من مضادات حيوية وأحماض ومعادن ثقيلة، وتقوم الأوليات والفيروسات البكتيرية بالقضاء على البلايين من البكتيريا الموجودة بالماء، إضافة إلى ذلك تؤثر درجة حرارة الماء وكمية الأوكسجين الذائب به والإضاءة ودرجة تركيز أيون الهيدروجين في التوازن الموجود بين الكائنات الحية الدقيقة الموجودة بالماء (Keshav rehan 1990).

وتقسم المياه في الطبيعة إلى أربع مجموعات، تشمل المياه الموجودة في الغلاف الجوي Atmospheric water على هيئة بخار في السحب، يتكاثف في صورة الندى أو المطر، والمياه السطحية Surface water مثل مياه الأنهار والبحار والبحيرات والمحيطات، والمياه الجوفية Ground water الموجودة تحت سطح الأرض، والمياه المخزنة Stored water التي توجد في خزانات أو بحار وبحيرات سفلية.

ويمكن التمييز بين ثلاثة أنواع من المياه هي:

أولًا: المياه العذبة Fresh water

تُعدّ الأحياء الدقيقة الموجودة في الغلاف الجوي Air-borne microorganisms المصدر الأول لميكروبات مياه الأمطار، وتزيد هذه الكائنات الحية الدقيقة في العدد والنوع بعد تكوين الجداول والأنهار بما تضيفه من مواد عضوية نتيجة عمليات النحت والترسيب، والمياه العذبة غير الملوثة تحتوي على بعض أنواع من بكتيريا التربة المترممة أذكر منها:

Micrococcus, Flavobacterium, Acromobacterium, Bacillus, Proteus, Leptospira

وفي المياه الغنية بالكثير من المواد العضوية، توجد بعض أنواع جنس Clostridium وبعض الأنواع غير الهوائية، وكثرة المواد العضوية بالطمي يجعل الحاجة أكثر إلى الأوكسجين اللازم من جهة لتنفس الكائنات الحية الدقيقة، ومن جهة أخرى لأكسدة المواد العضوية، وإلا سادت صور من الكائنات غير الهوائية. وعند ترسب الطمي والمواد العضوية تترسب معها الفطريات والبكتيريا إلى القاع، وينشأ عن ذلك نشاط بكتيريا في القاع أكثر منه

على السطح.

وإذا حدث تلوث للمياه العذبة بمياه المجاري يسود أنواع عدة من البكتيريا، من أهمها Escherichia coli التي توجد بكثرة في القناة الهضمية للإنسان والحيوان، وبعض أنواع جنس

Streptococcus التي تعيش في الأمعاء، إضافة إلى ذلك يوجد كثير من أنواع بكتيريا التربة المترممة مثل: Spirillum, Sarona, Micrococcus, Mycobacterium, Mycromonospra and Sphaerotillus، بينما يحتوي طين القاع على بعض أنواع البكتيريا اللاهوائية مثل Desulfovibrio. وتلوث المياه العذبة بمياه المجاري أو المخلفات الصناعية بما تحتويه من مواد مميتة لهذه الأنواع من البكتيريا يسبب خللًا في التوازن البيئي الموجود بين أنواع البكتيريا المختلفة، وتكون النتيجة تغيرًا في طعم الماء ورائحته ما يجعله غير صالح للشرب، إضافة إلى تلوثه (النخال 1998م، الوهيبي 2008م).

ثانيًا: المياه الجوفية Ground water

المياه الجوفية ومياه الآبار العميقة غالبًا ما تكون خالية من الطحالب والفطريات والبكتيريا، حيث تعمل طبقات التربة المختلفة التي تمر بها بوصفها مرشحات ميكروبية، وإن الأعماق السحيقة لا تناسب نمو معظم أنواع البكتيريا، وأما مياه الينابيع الحارة فتسود بها أنواع من البكتيريا المحبة للحرارة Thermophilic وبعض أنواع بكتيريا الكبريت والحديد، وهذه المياه تكون في الغالب صالحة للشرب إلا إذا حدث لها تلوث من مصادر أخرى.

ثالثًا: المياه المالحة Marin water

هناك أنواع من الأحياء الدقيقة لا تنمو إلا في درجات عالية من الملوحة تبدأ من 5 - 15%، وتعرف هذه الأنواع باسم الميكروبات الملحية Halophytic microorganisms، وتوجد هذه الأنواع في مياه البحار والمحيطات والبحيرات والمستنقعات الملحية، ويختلف نوعها باختلاف درجة حرارة الماء، ودرجة صفاء الماء أو عكارته والعمق إلى غير ذلك من الصفات والخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه المالحة، فالأنواع الموجودة في المياه الباردة محبة للبرودة Psychrophilic وفيسيولوجيًا محبة للملوحة Halophytic والأنواع الموجودة في الطبقات السطحية غالبًا ملونة Pigmented تحميها هذه الأصباغ من التأثير المميت للإشعاع الشمسي، ومنها أنواع: Achromobacter, Flavobacterium، وأما في الطبقات العميقة وفي القاع، فتسود أنواع من البكتيريا اللاهوائية.

البكتيريا الممرضة في المياه Pathogenic bacteria in water

تمثل المياه وسطًا بيئيًا مناسبًا تنمو فيه أنواع مختلفة من البكتيرية غير الممرضة وكذلك البكتيريا الممرضة، وينتقل بواسطة المياه كثير من الأمراض البكتيرية، ومن أهم هذه الأمراض تلك التي تصيب القناة المعوية للإنسان، مثل مرض التيفوئيد ويسببه بكتيريا Salmonella typhi، والباراتيفوئيد ويسببه أنواع مختلفة من بكتيريا Salmonella paratyphi، والكوليرا ويسببه

Vibrio comma، وكذلك مرض الدوسنتاريا ويسببه بكتيريا Shigella dysentariae، وتصل هذه البكتيريا إلى المياه عن طريق فضلات الإنسان (عبدالمعطي 1999م).

وقد ذُكِر سابقًا أن المياه لا تخلو من وجود البكتيريا بها؛ لذا لا بد من تنقية المياه قبل استخدامها، خصوصًا مياه الشرب، وتتلخص خطوات تنقية المياه Water purification لجعلها صالحة للشرب في ثلاث عمليات: العملية الأولى تسمى الترسيب Sedimentation حيث تتم هذه العملية في الخزانات الكبيرة للمياه، ويساعد عليها إضافة كبريتات الألمونيوم التي تتحول إلى هيدروكسيد الأمونيوم وهو مركب جيلاتيني تعلق به الشوائب بالبكتيريا الموجودة بالماء، أما العملية الثانية فهي الترشيح Filtration ويتم ذلك في مرشحات متدرجة من الرمل. والعملية الثالثة تعرف بالتطهير Disinfection وهي إضافة الكلور بتركيز معين يتراوح بين 0,2 - 1 مجم كلور لكل لتر ماء، ويترك الماء مدة من الزمن حتى يُعدّ صالحًا للشرب بعد خلوه من البكتيريا. ويمكن فحص الماء للتأكد من خلوه من هذه الكائنات الحية الدقيقة الممرضة وغيرها بطرق عدة، Atlas 1986)) منها:

1. عد البكتيريا على الأطباق Plate counts of Bacteria:

تُعدّ طريقة عد البكتيريا على الأطباق خطوة مبدئية للتأكد من خلو مياه الشرب بعد تنقيتها من البكتيريا، وفي هذه الطريقة تؤخذ عينة من المياه المراد تحليلها، وتحقن في أطباق معقمة تسمى أطباق بتري، تحتوى هذه الأطباق على وسط غذائي مناسب لنمو البكتيريا، وتُحفظ الأطباق في حاضنة عند درجة حرارة 35 درجة مئوية لمدة 24 ساعة، ثم تُستخرج الأطباق وتُعدّ المستعمرات البكتيرية فيها، ويحسب عددها في المليلتر الواحد من المياه، وتستخدم هذه الطريقة لمعرفة مدى كفاءة الخطوات المتبعة في تنقية المياه.

2. الكشف عن وجود بكتيريا القولون Tests for the presence of coli-form bacteria:

يتم الكشف عن وجود بكتيريا القولون في الماء بإجراء اختيارات عدة متتابعة تعتمد على دراسة الخصائص الفسيولوجية، ومنها قدرة هذا النوع من البكتيريا على إنتاج غاز في الوسط الذي تعيش فيه، إضافة إلى ذلك هناك المواصفات الظاهرية في الشكل الخارجي أو ما يعرف بالخصائص المورفولوجية لبكتيريا القولون.

3. استخدام الأغشية المرشحة Membrane filter technique:

تتلخص هذه الطريقة في إمرار حجم معين من الماء المراد تحليله على قرص معقم من المرشح البكتيري، حيث يقوم باحتجاز الخلايا البكتيرية الموجودة بالعينة على سطحه، ثم ينقل المرشح إلى منبت بعد إضافة وسط غذائي مناسب، ثم يُحفظ عند درجة حرارة 35 درجة مئوية، حيث تنمو

البكتيريا إن وجدت، ومن مميزات هذه الطريقة استخدام أي حجم من الماء وسهولة نقل المرشح البكتيري من وسط غذائي إلى آخر.

الأحياء الدقيقة في التربة Soil Microorganisms

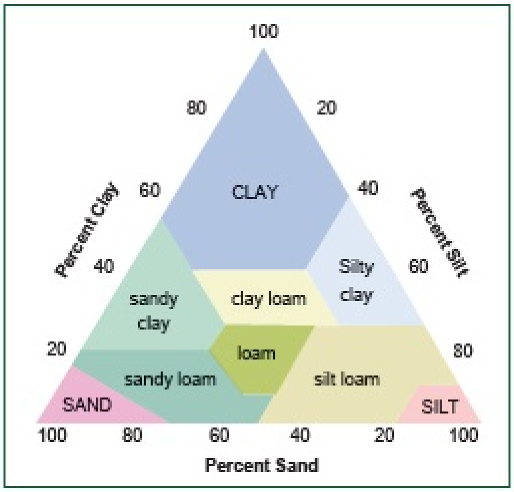
تشكل التربة الجزء الأعلى من سطح الأرض، ويعبر عن التربة الزراعية بطبقة الحراثة، وهي التي تصل إلى عمق متر واحد تقريبًا من قشرة الأرض السطحية. والتربة تختلف اختلافًا كبيرًا من مكان لآخر ومن بيئة إلى أخرى من حيث اللون والتركيب الكيميائي والفيزيائي والقوام والمحتوى الرطوبي وغير ذلك من الخصائص البنائية، وتتكيف الكائنات الحية الدقيقة مع خصائص التربة التي تعيش عليها من حيث الاحتياجات الغذائية والعوامل الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية. وتتكون التربة نتيجة لتفتت وتحلل الصخور والمواد النباتية والحيوانية، ويشغل الفراغات التي تتخلل حبيباتها -جزئيًّا- الهواء والماء. وفي المناطق الجافة تسود العوامل الفيزيائية والعوامل الكيميائية في تكوين التربة، بينما يحدث العكس في المناطق الرملية، وتختلف نسبة المادة العضوية باختلاف نوع التربة، ففي الأراضي الرملية الصحراوية تصل نسبة المادة العضوية إلى الحد الأدنى، وتزداد نسبتها في أراضي الغابات، حيث يكون الغطاء النباتي كثيفًا (الترك وآخرون 2002م).

وتشمل عمليات تكوين التربة Soil Formation القوى الطبيعية التي تؤدي إلى التفتيت والتغيير الكيميائي للأشياء المحيطة بنا (أبو زنادة 1403هـ). وتؤدي الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في التربة دورًا مهمًّا في تحليل بقايا النباتات والحيوانات، وينتج عن ذلك تحرر العناصر الغذائية في التربة، إضافة إلى تكوين ثاني أكسيد الكربون والمواد العضوية المستمدة التي تساعد على تحلل التربة، وتتركب التربة من حبيبات تختلف في أحجامها، ويمكن فصل حبيبات التربة إلى مجاميع مختلفة على أساس حجم الحبيبات المتباين.

والمقصود ببناء التربة Soil structure هو ترتيب الحبيبات أو الهيئة التي تتجمع بها حبيبات التربة بعد حرثها، ويتوقف على ذلك حجم الفراغات الذي يؤثر في درجة التهوية في التربة، وتشتمل المسامية في التربة على الجزء الذي شغله الماء والجزء الذي يشغله الهواء، وتصل المسامية عادةً إلى 50%، وتنخفض هذه النسبة في الأراضي الرملية، وترتفع في الأراضي الطينية، ولا يمكن معرفة درجة التهوية في التربة من المسامية وحدها، بل يجب لمعرفة ذلك تعيين حجم الفراغات، إذ إن الفراغات الواسعة غير الشعرية هي التي يشغلها الهواء بعد رشح الماء الذي يعقب سقوط الأمطار أو الري (الفالح وعياش 1424هـ). والفراغات الضيقة الشعرية هي التي يشغلها الماء الشعري في معظم الأوقات، ويتعذر مرور الهواء فيها، وتحدد نسبة الفراغات الشعرية كمية الماء الذي تحتفظ به التربة عقب الري أو سقوط الأمطار.

ويتكون قوام التربة Soil Texture من حبيبات ذات أحجام مختلفة، وهي الحصى والرمل والغرين والطين، ومن أهم العوامل التي تؤثر في الكائنات الحية الدقيقة والنباتات التي تعيش عليها النسب

بين أوزان هذه المجاميع من حبيبات التربة، وهو ما يعرف بالتركيب الميكانيكي، وأما التحليل الميكانيكي للتربة فيقصد به عملية فصل هذه المجاميع المكونة للتربة وتعيين وزن كل منها، ثم رسم مثلث قوام التربة (Mick Crawley 1996) الموضح في الشكل (2-1).


100
80
20
60
40
CLAY
Percent Clay
Percent Silt
40
60
Silty clay
sandy clay
clay loam
20
80
loam
sandy loam
silt loam
SAND
SILT
100
80
60
40
20
100
Percent Sand

الشكل (2-1): مثلث تحديد قوام التربة.

ولقد اتفق في الجمعية الدولية لعلوم التربة (Brower & Zar 1977) على تحديد حجم الحبيبات في كل مجموعة على النحو الآتي:

الحصى Gravel هي تلك الأجسام الصلبة التي يزيد قطرها على 2.0 مم.

الرمل الخشن Coarse Sand يتراوح قطر حبيباته ما بين 2.0 - 0.2 مم.

الرمل الناعم Fine Sand يتراوح قطر حبيباته ما بين 0.2 - 0.02 مم.

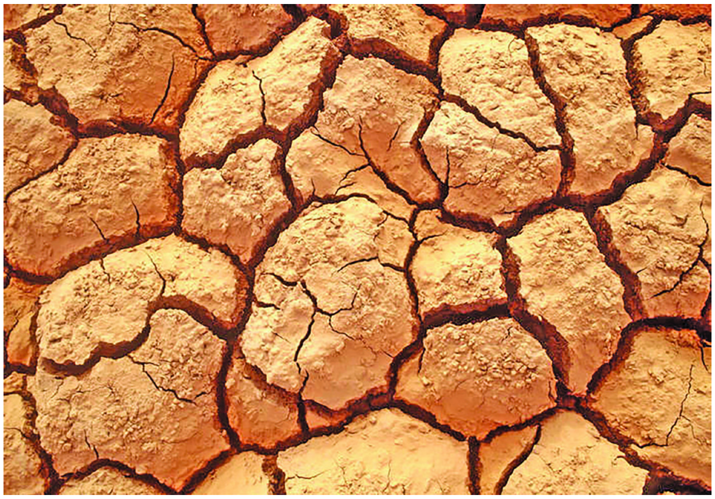
الغرين (الطمي) Silt يتراوح قطر حبيباته ما بين 0.02 - 0.002 مم.

الطين Clay يصل قطر حبيباته إلى 0.002 مم فأقل من ذلك.

والحبيبات الكبيرة في حجمها تحتجز بينها كميات ضئيلة من الماء؛ ولذلك تُعدّ خاملة، ولا تحمل الأراضي الرملية ذات الحبيبات الكبيرة كساءً خضريًّا وافرًا مع أن الجذور تنمو فيها بسهولة، وتحمل فروعًا غزيرة. وأما حبيبات الطين فهي غروية، ونظرًا لدقة حجمها فتحصر بينها فراغات شعرية دقيقة؛ ولذلك تكون قدرتها على حمل الماء وحمل الكاتيونات المتبادلة كبيرة جدًّا، وبذلك تتوافر في التربة الطينية العناصر الغذائية اللازمة للنبات.

ومن مساوئ التربة الطينية أنها عندما يضاف إليها الماء تتشرب حبيباتها بالماء، وتنتفخ، وتصبح لزجة، وعندما تجف تبقى حبيباتها ملتصقة بإحكام مع بعضها ما يؤدي إلى ظهور شقوق كبيرة

وعميقة تتسبب في تمزق الجذور كما في الشكل (2-2).



الشكل (2-2): التشقق في التربة الطينية.

وتُعدّ التربة النموذجية هي التي تكون فيها نصف المسامية من فراغات غير شعرية تسمح بمرور الغازات والنصف الآخر من فراغات شعرية تحتفظ بنسبة وافرة من الماء، وأما التربة التي تحتوي على نسبة عالية من الفراغات غير الشعرية ونسبة ضئيلة من الفراغات الشعرية وذلك لكبر حجم حبيباتها فتُعدّ جيدة التهوية وقليلة الاحتفاظ بالماء، وتُعدّ هذه الصفة الأخيرة من أبرز عيوب التربة الرملية، والتربة الطينية ذات الحبيبات الدقيقة المنفردة على العكس رديئة التهوية وكثيرة الاحتفاظ بالماء؛ ولكي تعالج رداءة التهوية في الأراضي الطينية يضاف إليها مواد عضوية أو جيرية، إذ إن هذه المواد تعمل على تجميع الحبيبات الدقيقة على صورة حبيبات مركبة تحصر بينها فراغات واسعة، وبذلك تزداد نسبة الفراغات غير الشعرية، ومن ثم تتحسن التهوية في هذه الأراضي.

وهناك نوع من الأراضي الطينية عندما تبتل تنتفخ حبيباتها بدرجة كبيرة، وتسد جزءًا من مسامها، وتصبح رديئة التهوية، ولا تصلح لنمو الجذور فيها، وتزداد المسامية في التربة بتحلل الجذور التي تخترقها تاركة القنوات التي كانت تشغلها فارغة، وبذلك تملؤها الغازات، وكذلك تعمل حركة الديدان في التربة على زيادة المسامية فيها، وتؤدي عملية الحرث إلى تفكيك الطبقة السطحية للتربة، فتتباعد حبيباتها، وتزداد التهوية.

ويقصد بتفاعل التربة Soil Reaction أي درجة تركيز أيون الهيدروجين في محلول التربة، ويعبر عن تفاعل التربة أو حموضة التربة بالرقم الهيدروجيني (pH). وتُعدّ التربة حامضية إذا كانت أيونات الهيدروجين في محلول للتربة أعلى في تركيزها من أيونات الهيدروكسل، وتُعدّ التربة قاعدية إذا كانت أيونات الهيدروكسيل في محلول للتربة أعلى في تركيزها من أيونات الهيدروجين، ويتساوى تركيزهما في التربة المتعادلة. وتتأثر كمية المحصول -لدرجة كبيرة- بالرقم الهيدروجيني

للتربة، وتشير الدراسات البيئية إلى أن الرقم الهيدروجيني المناسب لنمو معظم النباتات هو الواقع بين 5,6 - 5,7؛ أي إن التربة الضعيفة الحامضية أو القلوية هي الملائمة لنمو معظم النباتات (Brehm-Stecher & Johnson 2004, Brock & Madigan 1991).

وتكون الطبقة السطحية من التربة عادة أكثر حموضة من الطبقة تحت السطحية؛ ويرجع ذلك إلى وجود الأحماض الناتجة من تحلل المواد العضوية في الطبقة السطحية، ولتسرب الماء الذي يحمل القواعد من الطبقة السطحية للتربة إلى الطبقات السفلى، وإن للتضاريس تأثيرًا كبيرًا في الرقم الهيدروجيني للتربة، فعند قمم التلال يقل الرقم الهيدروجيني عنه في الوديان؛ ويرجع ذلك إلى أن الأمطار تحمل القواعد من المرتفعات إلى المنخفضات، حيث تتجمع فيها، والتربة في المناطق الجافة الحارة تختلف ما بين المتعادلة وشديدة القلوية؛ وذلك لقلة سقوط الأمطار، وهذا من شأنه إبقاء القواعد في الطبقة السطحية دون تسربها، وأيضًا لقلة تكوين الأحماض الناتجة من تحلل المواد العضوية، وأما التربة في المناطق الباردة الغزيرة الأمطار فتختلف ما بين الحامضية البسيطة والحامضية الشديدة، وثبت أن هناك علاقة بين الرقم الهيدروجيني وبعض الخواص الطبيعية والكيميائية للتربة (Stern 2000).

وكذلك يحدد الرقم الهيدروجيني درجة ذوبان أملاح الحديد والمنجنيز والمغنيسيوم والزنك في التربة، ففي المحاليل شديدة القلوية تصبح أملاح الحديد البسيطة عديمة الذوبان نسبيًّا ما يسبب فقدان اللون الأخضر في النباتات، ويرجع ذلك إلى أن عنصر الحديد يعمل بوصفه وسيطًا في تكوين الكلوروفيل، وفي التربة شديدة الحامضية تزداد درجة ذوبان هذه العناصر مثل الألمنيوم، والحديد، والمنجنيز، والزنك إلى درجة كبيرة تجعلها سامة، ومن هذا يتبين أن الأراضي القريبة من المتعادلة هي الأنسب لنمو معظم النباتات.

وتوجد علاقة أيضًا بين الرقم الهيدروجيني والخواص الطبيعية للتربة، فمن المعروف أن الحبيبات الغروية في التربة تحمل شحنات سالبة على سطحها، وهذه الشحنات لا تتعادل إلا إذا تجمعت على سطح الغروية الأيونات القاعدية، خاصة ثنائية التكافؤ، مثل الكالسيوم والمغنيسيوم، وأما أيونات الهيدروجين فلا تكفي لتعادل هذه الشحنات السالبة، ففي التربة شديدة الحامضية تكون كمية أيونات الكالسيوم والمغنسيوم غير كافية لتعادل الشحنات السالبة الموجودة على سطح الحبيبات الغروية، وبذلك تبقى الأخيرة في حالة تنافر، ولا تتجمع لتكون حبيبات مركبة ما يؤدي إلى قلة نفاذية التربة للماء ورداءة تهويتها.

وفي التربة القريبة من نقطة التعادل تستطيع أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم معادلة الشحنات السالبة الموجودة على سطح الحبيبات الغروية، وعندئذ تتجمع هذه الحبيبات البسيطة لتكون حبيبات مركبة، وتصبح التربة منفذة للماء وجيدة التهوية. وفي التربة شديدة القلوية يزداد عدد أيونات الصوديوم

والبوتاسيوم الموجود على سطح الحبيبات الغروية، ما يؤدي إلى تنافرها وعدم تجمعها، وهذا يفسد الخواص الطبيعية للتربة.

ملوحة التربة Soil salinity

تختلف الكائنات الحية الدقيقة فيما بينها من حيث درجة تحملها لملوحة التربة، ويمكن تقسيمها على هذا الأساس إلى ثلاثة أقسـام:

- كائنات حية دقيقة تنمو في الماء المالح أو الأراضي التي تحتوي على نسبة عالية من الأملاح، وتعرف هذه المجموعات بالملحية Halophytes.
- كائنات حية دقيقة لا تستطيع أن تعيش إلا في الأراضي التي تحتوي على نسبة قليلة من الأملاح، وتسمى الوسطية Mesophytes.
- كائنات حية دقيقة تستطيع أن تعيش في كلتا البيئتين، وتعرف هذه بالملحية الاختيارية Facultative Halophytes.

يتأثر توزيع الأملاح في الطبقات المختلفة من التربة باختلاف العوامل الجوية في الفصول المختلفة، ففي فصل الجفاف يتبخر الماء على سطح التربة، ويتحرك الماء الشعري إلى أعلى عند السطح، حيث يتبخر، وباستمرار عملية التبخر تتجمع الأملاح في الطبقات السطحية، وفي الفصل الذي تسقط فيه الأمطار يحمل ماء المطر -في أثناء رشحه- الأملاح من الطبقات السطحية إلى الطبقات العميقة. ومن العوامل التي تساعد على تراكم الأملاح على سطح التربة وجود طبقة صلبة أو غير منفذة للماء بالقرب من السطح، وكذلك فإن قرب مستوى الماء Water table من السطح الأراضي يعمل على تراكم الأملاح أيضًا.

وتنقسم الأراضي التي تحتوي على نسبة عالية من الأملاح التي تضر بنمو ووجود الكائنات الحية الدقيقة فيها إلى ثلاثة أقسام:

1. أراضي ملحية Saline soils وهي الأراضي التي تحتوي على كميات زائدة من الأملاح المتعادلة أو غير القلوية القابلة للذوبان، خاصة الكلوريدات والكبريتات، إضافة إلى الأملاح القليلة أو غير القابلة للذوبان نسبيًا، مثل كبريتات الكالسيوم، وكربونات الكالسيوم، والمغنيسيوم، وتزيد نسبة الكالسيوم والمغنيسيوم في القواعد المتبادلة، وهذه الخاصية تساعد على تجمع الحبيبات البسيطة ما يجعل التربة منفذة للماء، وبذلك يسهل علاجها بالغسيل والصرف، ولا يزيد الرقم الهيدروجيني في هذه التربة عن 8.5. وهذه الأراضي كانت تعرف قديمًا بالقلوية البيضاء White Alkali؛ وذلك لتجمع الأملاح على هيئة قشرة بيضاء فوق سطح الأرض في أغلب الأحوال،

وتعالج هذه الأراضي بالغسيل بالماء الكافي والصرف الجيد لإزالة الأملاح من المنطقة التي تنتشر فيها الجذور إلى الطبقات السفلى من التربة.

2. الأراضي الملحية القلوية Saline Alkali Soils وتشبه هذه الأراضي النوع السابق في احتوائها على نسبة عالية من الأملاح، ويختلف عنه في زيادة نسبة الصوديوم في القواعد المتبادلة الذي سيكون من شأنه زيادة القلوية في الأرض، وإفساد خواصها الطبيعية عن طريق تفرق الحبيبات الغروية ما يؤدي إلى تقليل نفاذية التربة للماء، وعدم توافر الظروف الملائمة لنمو الجذور، ويتلاشى تأثير الصوديوم في التربة في وجود الأملاح الذائبة، ويظهر مؤقتًا عند رشحها وتسربها إلى الطبقات السفلى.

3. الأراضي غير الملحية والقلوية Non-Saline Alkali Soils ويتميز هذا النوع من الأراضي باحتوائه على نسبة أقل من الأملاح الذائبة، ونسبة عالية من الصوديوم المتبادل، ونظرًا لقلة الأملاح الذائبة يظهر تأثير الصوديوم؛ لذلك تتصف هذه الأراضي بزيادة القلوية فيها (يتراوح الرقم الهيدروجيني بين 8.5 - 10)، وتتميز هذه الأراضي بقلة نفاذية التربة للماء، ويتعبأ الصوديوم الموجود على سطوح الغرويات، وقد تتكون كميات بسيطة من كربونات الصوديوم، وتوجد المادة العضوية في حالة تفرق شديد، وتتوزع على الحبيبات، وتضفي على التربة لونًا قاتمًا؛ لذلك أطلق على هذا النوع من الأراضي اسم القلوية السوداء Black Alkali Soils.

وإن زيادة تركيز الأملاح المتعادلة تتبعه زيادة في الضغط الأسموزي لمحلول التربة، وهذا بدوره يؤثر في نمو ووجود الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في التربة، فتأثير الأملاح يكون عن طريق رفعها للضغط الأسموزي لمحلول التربة، ولكن هناك نوع آخر من التأثير الخاص ببعض الأملاح لا تقل أهميته كثيرًا عن السابق متمثلًا في العمليات الفسيولوجية والبيوكيميائية للكائنات الحية الدقيقة، وتتناسب درجة تحمل الكائنات الحية الدقيقة للأملاح مع درجة انتشارها وكثرتها في الطبيعة، فكلما قل انتشار ملح من الأملاح في الطبيعة، قلت قدرة الكائنات الحية الدقيقة على تحمل هذا الملح حتى في محاليله المخففة، ومثال ذلك التأثير السام الذي ينجم عن وجود أملاح كبريتات النحاس، حتى في محاليل مخففة في الوقت الذي تتحمل فيه الكائنات الحية الدقيقة العادية محاليل من كبريتات الكالسيوم يصل تركيزها إلى درجة عالية.

المـادة العضوية Organic Matter

للمادة العضوية أثر كبير في الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة، وهذا من ثم يؤثر في نمو الكائنات الحية الدقيقة، وتشمل المادة العضوية بقايا النباتات والحيوانات سواءً الموجودة في التربة أو التي تضاف إلى التربة بما في ذلك جذور النباتات والأوراق التي تسقط على التربة وغيرها من مكونات المجموع الخضري، وإن أنسجة النبات تتركب عامة من 75% ماء و25% تقريبًا مادة جافة، وتتركب المادة الجافة للنباتات من الكربون والهيدروجين والأوكسجين، وهذه تكون 90% من

وزن المادة الجافة، وأما الجزء الباقي فيتركب من النيتروجين، والكبريت، والكالسيوم، والفسفور، والبوتاسيوم، وبعض العناصر الأخرى، وهذه العناصر التي تدخل في تركيب المادة الجافة توجد على صورة مركبات عضوية، مثل المواد الكربوهيدراتية كالسكريات، والنشا، والسليلوز، واللجنين، ومن المواد البروتينية، والدهون، والزيوت، والشمع، والأحماض العضوية. وأما المركبات غير العضوية أو المعدنية فتشتمل على مركبات الفسفور، والكالسيوم، والمغنيسيوم، والبوتاسيوم، والألمنيوم، والحديد، والمنجنيز، وتدخل هذه العناصر أيضًا في تركيب أملاح عضوية، وتكون أملاحًا غير عضوية (Schumaker 1996). ويمكن تقسيم المركبات الكيميائية التي تدخل في تركيب المادة العضوية إلى ثلاثة أقسام رئيسة هي ما يأتي:

- مركبات عضوية غير نيتروجينية.
- مركبات عضوية نيتروجينية.
- مركبات غير عضوية أو معدنية.

وتتحلل النشويات والسكريات والبروتينات والأحماض الأمينية سريعًا بواسطة كثير من الكائنات الحية الدقيقة، ويصحب ذلك عملية بناء للمواد القلوية للكائنات الدقيقة، وتتحلل المواد السليلوزية خاصة النصف سليلوزية بفعل كثير من الكائنات الدقيقة، وأما اللجنين فإنه بصفة خاصة يقاوم التحلل تحت الظروف اللاهوائية، ولكن تحت الظروف الهوائية يحدث له بعض التغيير.

وتتحلل البروتينات النباتية والحيوانية ومشتقاتها إلى أميدات Amides وأحماض أمينية Amino acids مختلفة الأنواع، وهذه تتحلل بدورها إلى ثاني أكسيد الكربون ومركبات الأمونيا وغيرها من المركبات البسيطة النهائية. وتستغل الأمونيا بواسطة الكائنات الحية الدقيقة، وتتأكسد إلى نيترات، وتتحرر الأيونات المعدنية في أثناء تحلل المادة العضوية وتكوين الدبال Humus (الشكل 2-3). وهذه العناصر المعدنية إذا لم تمتص بواسطة النباتات، فإنها تتسرب إلى الأعماق البعيدة من التربة بالغسيل، وتشتمل هذه العناصر الأساسية على الكبريت، والفسفور، والبوتاسيوم، والمغنيسيوم، والكالسيوم.

الشكل (2-3): تحلل بقايا النباتات وتكون الدبال.

وفي أثناء عملية تكوين الدبال من بقايا النباتات يحدث نقص سريع في المكونات القابلة للذوبان في الماء وزيادة نسبية في اللجنين ومركباته المعقدة وزيادة كذلك في البروتينات، ومن المرجح أن هذه البروتينات تنشأ نتيجة نشاط الكائنات الحية الدقيقة؛ أي إنها من نوع آخر يقاوم التحلل، ويختلف عن بروتينات النباتات التي تنحل سريعًا.

والدبال مادة غروية سوداء عديمة الذوبان في الماء (الشكل 2-15)، ويتركب من نسبة عالية من اللجنين (40 - 45%) والبروتينات (30 - 35%) وأما الجزء الباقي من الدبال فيتكون من الدهون والشموع وغيرها من المواد المقاومة للتحلل، وهذا المركب المعقد من اللجنين والبروتينات يجعل الدبال مقاومًا للتحلل. ولبطء تحلل الدبال أهمية كبيرة بالنسبة إلى النباتات، إذ إنه يُعدّ بمثابة مخزن للمواد النيتروجينية التي تتحرر تدريجيًّا، وبهذا يتمكن النبات من امتصاصها دون أن تفقد بالغسيل بماء المرشح.

ويؤدي الدبال دورًا مهمًّا في تحسين خواص التربة الطبيعية والكيميائية، فهو يعمل على زيادة قدرة التربة على الاحتفاظ بالماء، ويقلل من فقدان الماء بالتسرب السفلي إلى الأعماق، ويزيد من تهوية التربة خاصة التربة الطينية الثقيلة، ويحسن بناء التربة، إذ إنه يعمل على تكوين الحبيبات المركبة، وبذلك يقلل من الخسارة الناتجة عن عوامل التعرية بفعل الرياح.

ويحسن الدبال الخواص الكيميائية للتربة، إذ إنه يجعل من التربة مخزنًا يمد النباتات بالمركبات النيتروجينية تدريجيًّا، وإنه يساعد على تكوين الأحماض العضوية وغير العضوية التي تعمل بوصفها مذيبات للعناصر المعدنية المهمة للنباتات، وكذلك تكوين ثاني أكسيد الكربون ثم حامض الكربونيك، وهو مذيب قوي أيضًا للعناصر المعدنية، وإن للطبيعة الغروية للدبال أثرها الكبير في الاحتفاظ بمكونات الأسمدة والعناصر الغذائية المعدنية على سطوح الدبال الغروية، ويتجنب فقدانها بالرشح، وللمادة العضوية أثر كبير في نشاط الكائنات الحية الدقيقة في التربة، إذ إن هذه الكائنات

تحول المواد الغذائية في التربة إلى صورة مواد وعناصر بسيطة يمكن امتصاصها بواسطة النباتات واستغلالها (Wainwright and Al-Falih 1996).

خصوبة التربة

مما لا شك فيه أن للكائنات الحية الدقيقة دورًا بارزًا وفعالًا في زيادة خصوبة التربة، ويأتي في مقدمة هذا الدور أكسدة المعادن الأساسية في تغذية النبات وتحويلها إلى صور متاحة يسهل على النبات امتصاصها من محلول التربة وتوظيفها في بناء أنسجته وتراكيبه المختلفة، وذلك خلال دورات المعادن Mineral Cycles، فالبكتيريا لها دور بارز وكبير في دورة النيتروجين في الطبيعة من خلال عملية تثبيت النيتروجين الجوي وتحويله إلى نيتروجين في التربة على هيئة نيتريت Nitrate يمتصه النبات من التربة، ويحتجزه في مركبات عضوية في جسم النبات تنتقل بعده إلى الحيوان والإنسان عبر السلسلة الغذائية في النظام البيئي (Al-Falih 2002). وبذلك تسهم البكتيريا بوصفها أحد الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في التربة في زيادة خصوبة التربة نتيجة تحسين خواص تلك التربة، فالترب القلوية يمكن استصلاحها من خلال إضافة الكبريت بهدف تشجيع نمو البكتيريا التي تقوم بعملية أكسدة الكبريت Sulfar Oxidation وإنتاج غازات ثاني أكسيد الكبريت وثالث أكسيد الكبريت المعروفة بخواصها الحمضية، فتخفف بذلك من قلوية التربة، وتحسن من تفاعل التربة pH وتجعلها خصبة ومناسبة لنمو النبات. وعلى العكس من ذلك نجد أن الترب الحمضية يعمد المزارعون إلى استصلاحها من خلال ريّها بمحاليل مخففة من سماد الأمونيا بهدف زيادة محتوى الأرض من النيترات القلوية بفعل بكتيريا Nitrosomonas وبكتيريا Nitrobacter المسؤولة عن أكسدة مركبات النيتروجين في التربة، وذلك خلال عملية تسمى أكسدة النيتروجين N2-Oxidation. وإن أساليب الحرث والري الجيدة تساعد على نمو وتكاثر الكائنات الحية الدقيقة في التربة ما ينعكس إيجابًا على تحسين خواص التربة وزيادة خصوبتها.

إن وجود البكتيريا في التربة يفوق بأضعاف مضاعفة وجودها في البيئات الأخرى مثل الماء والهواء، حيث تُعدّ التربة الموطن الطبيعي للكائنات الدقيقة، وقد نشأت التربة نفسها نتيجة نشاط الكائنات الدقيقة على الصخور المعدنية، ومن وجهة النظر البيولوجية تُعدّ التربة نظامًا حيًّا (Living system)» معقدًا ديناميكيًّا غير ثابت نتيجة الأنشطة الحيوية المختلفة للكائنات الحية الموجودة بها.

ومن الممكن تقسيم مكونات التربة إلى (Alexander 1971):

1. جزيئات التربة من الحصى والرمل والطين.

2. بقايا النبات والحيوان، التي بعد تحللها تكون الدبال Humus.

3. المـاء.

4. الغازات، مثل: غاز الأوكسجين، وثاني أكسيد الكربون، وبعض الغازات الأخرى التي توجد بين حبيبات التربة.

5. الكائنات الحية، وتشمل جذور النباتات والحيوانات الأولية والحشرات والديدان والطحالب والفطريات والإكتينوميسيتات والبكتيريا. وتتراوح أعداد البكتيريا الموجودة بالتربة في الأحوال العادية بين 610 - 710 لكل جرام من التربة في المتوسط، وتتأثر أعداد البكتيريا الموجودة بالتربة بعوامل عدة، منها ما يأتي:

أ) طبيعة التربة: فالتربة الطينية تختلف عن التربة الصفراء أو الرملية من حيث تركيبها، ومكوناتها، ومحتوياتها، وقد وُجِد أن التربة الغنية بالمواد العضوية تكون دائمًا غنية بالكائنات الحية الدقيقة، ومنها البكتيريا.

ب) تفاعل التربة pH: تؤثر درجة حموضة التربة التي يعبر عنها بتفاعل التربة بشكل مباشر في نوعية وعدد الأحياء الدقيقة الموجودة في التربة.

جـ) المحتوى المائي للتربة: مما لاشك فيه أن ماء التربة يؤدي دورًا أساسيًّا وبارزًا في وجود الأحياء الدقيقة بها، ويظهر ذلك بوضوح في المناطق الجافة، حيث يقل وجود الأحياء الدقيقة في الترب الصحراوية مقارنة بأعدادها في الترب الزراعية الرطبة (Taurop 1997).

د) نقص بعض العناصر الغذائية، مثل الفسفور أو المواد الغذائية الذائبة مثل النترات يؤثر في وجود الفطريات والبكتيريا في التربة.

هـ) الملوحة: تساعد ملوحة التربة على ازدهار بعض أنواع الأحياء الدقيقة المحبة للملوحة مقابل اختفاء معظم الأنواع الميكروبية في الترب الملحية.

و) العمق: حيث تقل أعداد الأحياء الدقيقة بزيادة عمق التربة، فيكثر وجود الفطريات والطحالب والبكتيريا في الطبقات السطحية عنها في الأعماق.

ز) التهوية ودرجة حرارة التربة: دلت البحوث والدراسات على أن من العوامل الرئيسة في وجود الأحياء الدقيقة في التربة درجة الحرارة وعامل التهوية، حيث تتأثر هذه الكائنات الحية الدقيقة سلبًا بارتفاع درجة الحرارة وقلة التهوية.

تقسم البكتيريا بحسب وجودها بالتربة إلى المجموعات الثلاث الآتية:

1. بكتيريا متوطنة:

هذه البكتيريا توجد في التربة بأعداد كبيرة نسبيًّا وثابتة، ولا تتأثر بوجود أو غياب بعض المواد الغذائية، ونشاطها التخميري ضعيف مثل بكتيريا Arthrobacter.

2. بكتيريا تخميرية

البكتيريا التخميرية تكون ذات نشاط تخميري مرتفع وأعدادها غير ثابتة، وترتبط بوجود المادة التي تخمرها substrate حيث تزيد مادة التخمير في وجودها، ومن أمثلتها البكتيريا محللة السليلوز والبكتيريا التي تؤكسد الكبريت، وبكتيريا تثبيت النتروجين... إلخ، ومنها جنس Bacillus، وجنس Pseudomonas.

3. بكتيريا غير متوطنة

البكتيريا غير المتوطنة تكون غير موجودة أصلًا في التربة، ولكنها تدخل التربة عن طريق الإنسان، مثل البكتيريا المغذية التي يضيفها الإنسان عند زراعة المحاصيل البقولية أو عن طريق زراعة المحاصيل البقولية أو عن طريق فضلات الإنسان والحيوان، وتعيش هذه الأنواع في التربة مدة معينة، ثم تختفي.

التحلل الحيوي في التربة

وجود الأحياء الدقيقة في التربة بأعداد هائلة له دور مهم في تكوين التربة، حيث تقوم هذه الكائنات الحية الدقيقة من طحالب وفطريات وبكتيريا بأنشطة متنوعة تعود بالنفع على خصائص التربة وقوامها وتركيبها ما ينعكس إيجابًا على النبات ثم الحيوان والإنسان، ويمثل تحلل المادة العضوية من بقايا النباتات والحيوان بالتربة الدور الأساسي الذي تؤديه الكائنات الحية الدقيقة، وقد تكون المادة العضوية بالتربة نيتروجينية أو غير نيتروجينية (Alexander 1977). وفيما يأتي شرح تفصيلي لأبرز الأنشطة الحيوية التي تقوم بها الكائنات الحية الدقيقة في التربة:

أولًا: تحلل المركبات غير النيتروجينية

تشمل هذه المجموعة من المركبات غير النيتروجينية كلًّا من الكربوهيدرات بأنواعها المختلفة، والأحماض العضوية، والهيدروكربونات، والدهون، والزيوت، وكذلك الشموع.

1. تحلل السكريات البسيطة: تتوقف عملية التحلل هذه على طبيعة السكر ونوع الكائن الحي والظروف البيئية المختلفة، وخصوصًا التهوية، ففي الظروف غير الهوائية يتحول الجلوكوز مثلًا إلى حمض اللاكتيك Lactic acid أو كحول إثيلي أو حمض بيوتيريك Butyric acid، وفي الظروف الهوائية تتأكسد الأحماض والكحولات الناتجة إلى غاز ثاني أكسيد الكربون وماء.

2. تحلل النشا: يتحلل النشا بفعل البكتيريا إلى دكسترينات Dextrine ثم سكر شعير Maltose ثم جلوكوز، ويقوم بهذه العملية كثير من أنواع البكتيريا العصوية المتجرثمة مثل *Bacillus amylotoroue*. وبعض السلالات التابعة لهذه الأنواع تكون محبة للحرارة، وتنتج أنواعًا من أنزيم الأميليز amylase وهي نشطة عند درجات حرارة تصل إلى 100م.

3. تحلل السليلوز: تنتج البكتيريا المحللة للسليلوز أنزيم السليوليز Cellulase الذي يحلل السليلوز إلى سليوبيوز Cellubiose الذي يتحلل بدوره بفعل أنزيم Cellubiase إلى جلوكوز. ويقوم بعملية تحليل السليلوز في التربة مجموعتان مختلفتان من البكتيريا: الأولى هوائية، والثانية لاهوائية.

وتعمل البكتيريا الهوائية على تحليل السليلوز تمامًا، وينتج في النهاية غاز ثاني أكسيد الكربون، ومن أمثلتها البكتيريا Cytophase والبكتيريا *Sporocytophase*. وأما في حالة البكتيريا غير الهوائية، فإن عملية التحلل ينتج عنها بعض الأحماض العضوية والكحولات، ومن أمثلة البكتيريا غير الهوائية التي تحلل السليلوز جنس Clostridium.

4. تحلل الهيموسليلوز: تشمل مركبات الهيموسليلوز مجموعة من السكريات الكثيرة، مثل بنتوزان Pentozan وأربان Aroban، وينتمي البكتين Pectin واليورنيدات Uronider إلى مركبات الهيموسليلوز، وتتحلل هذه المركبات بفعل البكتيريا إلى سكريات بسيطة، وينتمي معظم أنواع البكتيريا التي تسبب أمراضًا للنبات إلى هذه المجموعة، ومنها البكتيريا المسببة للعفن الطري في النباتات، وبكتيريا *Clostridium tutyricum* التي يستخدم في عملية تعطين الكتان.

5. تحلل الدهون: يعتقد أن السبب الرئيس في تكوين الرواسب البترولية هو تحول المواد الدهنية في ظروف غير هوائية بفعل الكائنات الدقيقة في باطن الأرض، فقد أثبتت الدراسات البيئية أن بكتيريا *Clostridium perfrinee* لها دور بارز في تحول الأوليات Oleates إلى سائل أسود قابل للاشتعال يشبه بعض منتجات البترول، وتنتج بعض أنواع البكتيريا أنزيم Lipase الذي يحلل الدهون إلى أحماض دهنية وجليسرين.

ثانيًا: تحلل المركبات النيتروجينية

تُعدّ المركبات النيتروجينية من أهم المكونات في التربة، حيث تؤدي دورًا بارزًا في خصوبة التربة وإمدادها بالعناصر الغذائية الأساسية في نمو النبات. ويمكن تقسيم المركبات النيتروجينية في التربة إلى قسمين أساسيين (Marshall 1985) هما ما يلي:

أ) مركبات نيتروجينية عضوية:

من أهم هذه المركبات البروتينات، وتوجد المركبات النيتروجينية في التربة بنسب تتراوح بين 1.5-20%، فهي في بذور الحبوب ونشارة الخشب تصل إلى 1.5%، بينما تصل إلى 20% في بعض الأسمدة الحيوانية، مثل سماد الدجاج وسماد الأبقار، وتعمل البكتيريا في التربة على تحلل البروتينات، وذلك بواسطة مجموعة من الأنزيمات المحللة للبروتين Proteolytic enzymes ومن هذه البكتيريا B.subtilis، وتُعدّ اليوريا من المركبات النيتروجينية العضوية المهمة بالتربة، وتستطيع كثير من بكتيريا التربة تحليلها وتحويلها إلى نشادر أو إلى أمونيا ثم إلى نيترايت NO2 ونيتريت NO3.

ب) مركبات نيتروجينية غير عضوية

تشمل هذه المركبات النيتروجين الغازي والأمونيا وأملاح النيتريتات والنترات، ومن الممكن تلخيص الدور الذي تؤديه البكتيريا في هذا الصدد في العمليات الثلاث الآتية:

العملية الأولى تسمى تثبيت النيتروجين N2-Fixation ويتم ذلك إما تكافليًّا كما هو الحال في بكتيريا العقد الجذرية التي تنتمي إلى جنس Rhizobium أو لا تكافليًّا كما هو الحال في بكتيريا التربة Clostridium وكذلك Azotobacter.

العملية الثانية تسمى أكسدة النيتروجين N2-Oxidation ويتم ذلك إما بتحويل النشادر إلى نيتريتات (NO2) وتقوم بذلك بكتيريا Nitrosomonas أو بتحويل النيتريتات إلى نترات (NO3) وتقوم بذلك بكتيريا Nitrobacter.

العملية الثالثة تسمى Denitrification وهي استغلال النترات بعد تكوينها بواسطة الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في التربة، ويتم ذلك إما مباشرة أو بعد اختزالها إلى نيتريتات أو حتى إلى نيتروجين غازي، ويقوم بهذه العملية كثير من البكتيريا نذكر منها Micrococus, denitriflosan .Thiobacillus, denitrificens, Escherichia coli

ثالثًا: تحلل مركبات الكبريت

تؤدي الكائنات الحية الدقيقة في التربة دورًا مهمًّا في التفاعلات البيوكيميائية التي تحدث للكبريت من أكسدة واختزال وتحلل لمركبات الكبريت المختلفة، ويمكن تلخيص هذه التفاعلات في الآتي:

1. يُوجَد الكبريت في التربة في صورته المعدية S، ومعلوم أن النباتات الراقية والحيوانات لا تستطيع استغلال الكبريت في صورته العنصرية، ولكن تقوم بعض أنواع البكتيريا بأكسدة الكبريت في صورته العنصرية وتحويله إلى كبريتات، مثل البكتيريا العضوية Thiobacillus thiooxidans. وبذلك يكون الكبريت متاحًا ويمكن الاستفادة منه وتوظيفه في جسم النبات، وينتقل عبر السلسلة الغذائية إلى الحيوان والإنسان.

2. تستغل النباتات الكبريتات في تكوين البروتين، وعند تحلل البروتين في التربة تنتج بعض الأحماض الأمينية التي تحتوي على الكبريت، مثل أحماض: السستين، والسستاتين، والمثيونين. وتستطيع بعض أنواع البكتيريا غير ذاتية التغذية استغلال هذه الأحماض في غذائها، ويتحرر الكبريت.

3. تستطيع بعض أنواع البكتيريا من جنس Desulfovibrio اختزال الكبريتات إلى كبريتيد الهيدروجين H2S، وتقوم بعض أنواع البكتيريا ضوئية التغذية بأكسدة كبريتيد الهيدروجين وتحويله

إلى كبريت عنصري مرة أخرى.

الفصل الثالث

الأحياء الدقيقة في النظام البيئي

Microorganisms in the Ecosystem

- مجتمعات الأحياء الدقيقة والنظام البيئي.
- تقدير الأعداء والكتلة الحيوية للأحياء الدقيقة.
- عينات التربة.
- عينات الماء.
- عينات الرواسب.
- عينات الهواء.
- تجهيز العينات.
- تقدير العدد الكلي للأحياء الدقيقة.
- تقدير الكتلة الحيوية للأحياء الدقيقة.

الفصل الثالث

الأحياء الدقيقة في النظام البيئي

Microorganisms in the Ecosystem

تشكل الأحياء الدقيقة جزءًا مهمًّا ومكونًا رئيسًا من المكونات الحية للنظام البيئي، سواءً كان هذا النظام البيئي في بحيرة أو في نهر أو على اليابسة أو في غابة أو في مستنقع، ويقصد بالمكونات الحية جميع الأحياء في النظام البيئي، ويشمل ذلك أنواعًا مختلفة من الحيوانات والنباتات والكائنات الحية الدقيقة والإنسان، ويطلق على مجموعة الكائنات الحية التي تعيش في نظام بيئي، وترتبط فيما بينها بعلاقات متبادلة اسم (المجتمع الحيوي). ففي نظام بيئي كبحيرة مثلًا، فإن مجموعة الكائنات الحية التي تعيش في البحيرة، وترتبط فيما بينها بعلاقات غذائية تسمى مجتمعا حيويًّا (Frey-Klett et. al. 2011, Marsh 2003, McAlester et. al. 2008).

وتضم الأحياء الدقيقة مجموعة هائلة من الكائنات الحية تشمل البكتيريا والفطريات والطحالب، وهذه الكائنات الحية الدقيقة أوجدها الله عزوجل في هذا الكون الفسيح لتشكل جزءًا مهمًّا وأساسيًّا في النظام البيئي ممثلة للمحللات Decomposers، وأودع فيها الخالق سبحانه وتعالى من الخصائص والصفات ما يمكنها من القيام بدورها في النظام البيئي على أكمل وجه وبكل مهارة واقتدار، وسوف أستعرض فيما يأتي أبرز الجوانب التطبيقية والصفات والخصائص لكل منها، والأهمية الاقتصادية لهذه الكائنات الحية الدقيقة التي تعكس أهمية الدور الذي تقوم به هذه الكائنات الحية الدقيقة في البيئة المحيطة بنا وبجميع مكونات النظام البيئي (Atlas and Bartha 1993).

وإضافة إلى النشاطات التي تقوم بها الكائنات الحية الدقيقة في الطبيعة سواءً ما كان منها متعلقًا بتحليل المواد أو زيادة خصوبة التربة أو دورات المعادن، فهناك كثير من النشاطات الميكروبية التي تعود على الإنسان بالنفع والفائدة، والتي تشمل الاستخدامات الكثيرة للكائنات الحية الدقيقة في حياتنا اليومية، واستغلالها مباشرة بوصفها غذاءً للإنسان ودواءً، وتستعمل أيضًا في بعض العمليات الصناعية الخاصة بإنتاج بعض المواد الغذائية.

ويبرز دور الأحياء الدقيقة في عدد من الجوانب الأساسية في البيئة، منها دور الأحياء الدقيقة في إكمال دورات العناصر المختلفة في الطبيعة مثل الكربون، والأوكسجين، والنيتروجين، والفسفور، والكبريت، والماء، وأكسدة هذه المعادن والمركبات في صورة متاحة للنبات يستفيد منها في تغذيته وإعادة تدويرها في النظام البيئي، وإضافة إلى الأهمية البيئية للأحياء الدقيقة، وهذه تشمل دورها في خصوبة التربة والتحلل الحيوي والتخلص من الفضلات وتكوين الوقود الحفري والصناعات الكيميائية والغذائية والدوائية، ويشهد هذا القرن الحالي الواحد والعشرون ثورة علمية هائلة في استغلال الأحياء الدقيقة صناعيًّا وتوظيفها لخدمة الإنسان في شتى نواحي حياته المتنوعة، وفيما يلي

استعراض لأبرز الأدوار التي تقوم بها الفطريات والطحالب والبكتيريا في حياة الإنسان وفي البيئة من حوله (السراني وآخرون 2000م، طرابلسي 2001م).

فإن الفطريات تعمل إلى جانب البكتيريا على تفكيك المواد العضوية وتحليلها إلى عناصرها الأولية، فتزيد بذلك من خصوبة التربة، وتخلص البيئة من الآثار السلبية لهذه المواد، (Al-Falih and Al-Jaloud 2003)، وتكتسب بعض الفطريات أهمية غذائية كبيرة بالنسبة إلى الإنسان، فبعض أنواعها تحتوي على كميات عالية من البروتين والدهون والفيتامينات كفطر عيش الغراب Mushrooms وفطريات الكمأة Truffles، وبعضها الآخر يفيد في تحضير بعض أنواع الجبن وحمض الخل وتخمير العجين، وتستطيع الفطريات إفراز عدد كبير من الأنزيمات، يختلف عددها ونوعها باختلاف البيئات التي تنمو عليها، فتساعد هذه الأنزيمات الفطر على تفكيك وتحليل المواد العضوية المعقدة إلى مواد بسيطة، يستطيع النبات أن يمتصها، ويستفيد منها مباشرة، وبعض أنواع الفطريات تحتوي على أنزيمات عدة ومتنوعة تساعد على إتمام بعض التحولات الكيميائية التي ينتج عنها مواد ذات أهمية اقتصادية، مثل الكحول وحمض الستريك Citric acid وبعض الأحماض الدهنية المستخدمة في الطب، وتفرز بعض الفطريات أنزيمات تساعد على نضج أنواع من الجبن، مثل جبن الروكفورت، ومن الناحية الطبية نجد أن بعض الأجناس الفطرية كفطر البنيسيليوم Penicillum وغيره من الفطريات تتمتع بأهمية طبية، حيث يستخرج منها بعض المضادات الحيوية كالبنسيلين الذي يستخدم في علاج كثير من الأمراض البكتيرية التي تصيب الإنسان والحيوان، حيث يعمل على إيقاف نمو هذه البكتيريا وقتلها.

وتُعدّ الطحالب من أهم المنتجين الأولين للمادة العضوية على سطح الأرض وحلقة مهمة في السلسلة الغذائية، فالفيتوبلانكتون Phytoplankton (الطحالب العالقة في الماء) تشكل المصدر الغذائي الرئيس للأسماك وللأحياء المائية الأخرى، وإنها تُغني الوسط المائي من خلال قيامها بالبناء الضوئي بغاز الأكسيجين اللازم لتنفس الكائنات الحية، وتُعدّ الطحالب الحمراء مصدرًا غذائيًّا مهمًّا للإنسان، يستمد منها البروتين النباتي والفيتامينات وبعض العناصر المعدنية المهمة، ويستفاد من الطحالب البحرية في صناعة الورق وتحضيره، ويُستخدم مسحوق هياكل طحالب الدياتومات Diatomae في عمليات الترشيح وفي تحضير دهانات المعادن المختلفة ومعاجين الحشو والمواد العازلة الصناعية، ويستخدم مسحوق الطحالب المجففة في صناعة عدد من المواد الطبية والصناعية، مثل الألجينات Algins والآجار Agar والكاراجين Carrageen ويتم خلطه مع أعلاف الحيوانات، وتُستخدَم بعض الطحالب بوصفها نباتات طبية لمعالجة بعض الأمراض، مثل اضطرابات الغدة الدرقية Goiter، والاضطرابات الهضمية (السراني وآخرون 2002م).

وأما البكتيريا فيُنظَر إليها بشكل عام على أنها عدو للإنسان، ولكن الحقيقة مغايرة لذلك، فصحيح أن البكتيريا تفسد أغذيتنا، وتسبب لنا كثيرًا من الأمراض، ولكن فوائدها للإنسان أكبر بكثير من أضرارها، فالبكتيريا من أوسع الكائنات الحية الدقيقة انتشارًا، وأحد المحللات الرئيسة في النظام

البيئي، فمن الناحية الطبية يُستَفاد من بعض الأنواع البكتيرية في إنتاج مضادات حيوية تكون مثبطة لنمو غيرها من الأنواع البكتيرية، وتفيد أنواع بكتيرية أخرى في إنتاج عدد من الأنزيمات التي تُستخدَم في الصناعات الطبية كأنزيم البروتييز Protease المحضر من البكتيريا *Bacillus subtilis*. وتُعدّ بعض الأنواع البكتيرية مصدرًا مهمًّا للحصول على الفيتامينات كفيتامين بـ 12 (كوبال أمين) المحضر من البكتيريا *Pseudomonas denitrificans*.

وتعمل البكتيريا إلى جوار الفطريات على إعادة تدوير المواد العضوية الناجمة عن بقايا وجثث الحيوانات والنباتات وتحويلها إلى عناصرها المعدنية الأولية (كربون، هيدروجين، أكسجين، نيتروجين، كبريت، فسفور، كالسيوم،...) التي يمكن أن تستخدم مرة ثانية في إعادة تصنيع الغذاء العضوي لدى النباتات الخضراء عبر عملية البناء الضوئي (Bloemberg and Lugtenberg 2001). وتعمل بعض الكائنات الحية الدقيقة، ومنها البكتيريا على تخمير كثير من المواد العضوية المعقدة محولة إياها إلى مركبات كيميائية ذات أهمية كبرى بالنسبة إلى الإنسان، مثل الخل والكحول الإيثيلي والأسيتون، وتسهم بكتيريا حمض اللاكتيك في تخمير الحليب وتخثره محولة إياه إلى حليب متخمر يمكن أن يفيد في إنتاج مشتقات الألبان المختلفة كالجبن، والزبدة، والقشدة، واللبن.

وتحتاج جميع النباتات إلى النيتروجين من أجل تصنيع موادها البروتينية، ولكنها لا تستطيع تثبيت النيتروجين الجوي، وتقوم مجموعتان من البكتيريا بتثبيت النيتروجين الجوي وتحويله إلى نيتروجين محتجز ضمن مركبات عضوية، وتعيش المجموعة الأولى حرة في التربة ومنها البكتيريا آزوتوباكتر Azotobacter وكلوستريديوم Clostridium، بينما توجد الثانية متعايشة مع جذور بعض النباتات ضمن العقد الجذرية، ومنها البكتيريا ريزوبيوم Rhizobium، (Al-Falih 2002). وتتغذى الحيوانات على النباتات مستمدة منها النيتروجين الذي يسهم في بناء الأحماض الأمينية، ومن ثم البروتين في أجسام الحيوانات، ومع موت النباتات والحيوانات تتفكك البروتينات إلى أحماض أمينية مختلفة، ويجري بواسطة مجموعة من البكتيريا *Ammonifying bacteria* وعبر عملية إنتاج الأمونيوم Ammonification تحويل الأحماض الأمينية إلى مركب الأمونيا، ويمكن خلال هذه العملية أن ينطلق قسم من الأمونيا بشكل غازي إلى الجو، إلا أن القسم الأعظم منها يبقى في التربة على هيئة أملاح الأمونيوم، وتقوم أجناس أخرى من البكتيريا وعبر عملية التآزت Nitrification بتحويل أملاح الأمونيوم إلى نترات ومنها بكتيريا النتروزوموناس Nitrosomonas والنيترو باكتر Nitrobacter، حيث يمكن لجذور النبات امتصاص النترات والاستفادة منها ثانية في تصنيع البروتينات النباتية، وهكذا تتكرر دورة النيتروجين مرة أخرى.

وتُعدّ البكتيريا الزرقاء (السيانية) Cyanobacteria من الكائنات المنتجة للمادة العضوية الأولية، وتحمل بعض أنواعها تراكيب فريدة تسمى الحويصلات المتغايرة Heterocysts تعمل بوصفها مواقع لتثبيت النيتروجين الجوي، حيث يتم داخل هذه التراكيب تحويل غاز النيتروجين الجوي ($N2$) إلى مركبات كيميائية يستفيد منها النبات، ويمكن لبعض مستعمرات البكتيريا الزرقاء أن

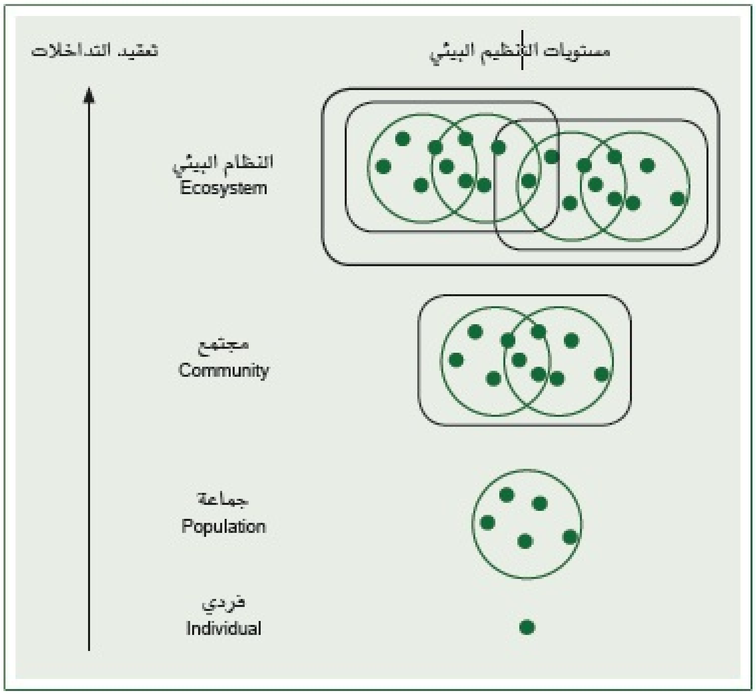
تشكل حالة تكافلية مع بعض النباتات الحزازية مثل نبات أنثوسيروس Anthoceros والنباتات السرخسية مثل جنس آزولا Azolla ومع جذور بعض النباتات البذرية كنبات السيكاس Cycas، ويمكن لبعض أجناسها (كالنوستوك Nostoc والأنابيناAnabaena) أن تعيش مع بعض الأجناس الفطرية معيشة تكافلية مكونة الأشنات Lichens.

مجتمعات الأحياء الدقيقة والأنظمة البيئية
Microbial Communities and Ecosystems

مفهوم البيئة Concept of Ecology يقصد به الطبيعة، بما فيها من أحياء وغير أحياء؛ أي العالم من حولنا فوق سطح الأرض، وهذا يشمل جميع الظروف والعوامل الخارجية التي تعيش فيها الكائنات الحية، وتؤثر في العمليات التي تقوم بها، فالبيئة هي الإطار الذي تعيش فيه الكائنات الحية، ويحتوي على التربة والماء والهواء، وما يتضمنه كل عنصر من هذه العناصر الثلاثة من مكونات جمادية وكائنات حية، وما يسود هذا النظام من مظاهر شتى من طقس ومناخ ورياح وأمطار وجاذبية ومغناطيسية، ومن علاقات متبادلة بين هذه العناصر. وعلم البيئة Ecology هو العلم الذي يحاول الإجابة عن بعض التساؤلات عن كيف تعمل الطبيعة وكيف تتعامل الكائنات الحية مع المكونات الأخرى أو مع الوسط المحيط بها سواء الكيميائي أو الطبيعي، وهذا الوسط يطلق عليه النظام البيئي Ecosystem، ويتكون النظام البيئي من كثير من الكائنات الحية والعوامل غير الحية، وتتفاعل مكونات هذا النظام مع بعضها لتشكل كلًّا متوازنًا ومستقرًّا، حيث تقوم النباتات بتثبيت الطاقة الشمسية وصنع المواد الكربوهيدراتية، فتدخل بذلك الكربون والطاقة في حلقة الحياة، ثم تنتقل الطاقة التي ثبتتها النباتات إلى أجسام الحيوان والإنسان عن طريق أكلها للنباتات أو الحيوانات التي تغذت على النباتات، ثم تقوم الكائنات الحية الدقيقة المحللة Decomposers بتفكيك بقايا وجثث تلك الكائنات الحية وتحولها إلى مواد بسيطة تستعملها النباتات في غذائها مرة أخرى، وللأحياء الدقيقة بوصفها محللات أهمية خاصة ورئيسة في كل نظام بيئي من النظم البيئية المتنوعة، إذ إنها تسمح بإعادة استعمال المواد الغذائية بشكل مستمر وبذلك يتم ضمان استمرار النظام البيئي (Blekhman et. al. 2015, Bloem et. al. 2006, Allende et. al. 2007).

وتقسم مكونات النظام البيئي إلى مجموعتين رئيستين هما مكونات غير حية (العوامل الطبيعية): وهي مجموعة من العوامل غير الحية التي تؤثر في حياة الكائنات الحية، وتحدد نوعيتها وأماكن وجودها، وتحدد نوعية العلاقات بين الكائنات الحية، ومكونات حية (العوامل الحيوية): وهي جميع الأحياء في النظام البيئي. ويشمل ذلك أنواعًا مختلفة من الحيوانات والنباتات والكائنات الحية الدقيقة والإنسان، ويطلق على مجموعة الكائنات الحية التي تعيش في نظام بيئي، وترتبط فيما بينها بعلاقات متبادلة اسم (المجتمع الحيوي). ففي نظام بيئي -كبحيرة مثلًا- فإن مجموعة الكائنات الحية التي تعيش في البحيرة، وترتبط فيما بينها بعلاقات غذائية تسمى مجتمعًا حيويًّا.

وإن تجمع أفراد النوع الواحد في منطقة بيئية يشكل ما يسمى الجماعة Population ومجموعة الجماعات التي تعيش مع بعضها في منطقة بيئية، وتتفاعل مع بعضها وتشكل المجتمع Community، وتفاعل المجتمعات الحية مع العوامل غير الحية في البيئة المحيطة تُكوّن ما يسمى النظام البيئي Ecosystem كما في الشكل (3-1).



الشكل (3-1): مستويات التنظيم البيئي

نادرًا جدًّا ما تكون الجماعات الميكروبية بمفردها في البيئة، بل تُوجَد مع مجتمعات من الكائنات الحية الأخرى (Buscot and Varma 2005). ويصنف المجتمع بأنه أعلى مرحلة في التنوع البيئي، ويحتل الأعضاء الأصليون Autochthonous في المجتمعات الحيز Niche أو المكانة البيئية المناسبة في النظام البيئي، وتتنافس الأحياء الدقيقة فيما بينها ومع الكائنات الحية الأخرى داخل النظام البيئي للحصول على احتياجاتها الغذائية اللازمة لاستمرار نموها وتكاثرها. وفي بعض الأحيان تختفي الأحياء الدقيقة من المجتمع بسبب تنافس إقصائي، ولكن هناك عدد من العوامل تسمح بالوجود التعاوني Coexistence، وتؤكد النظريات البيئية الحديثة أن الاضطرابات في أوساط الكائنات الحية الدقيقة Disturbances والتغير أو الاختلاف البيئي Environmental Heterogeneity هي عوامل مهمة في ظهور الوجود التعاوني للجماعات التنافسية في الموطن نفسه، وفي بعض الأوقات تحدث عمليات النجاح في نماذج مخصصة في بيئة من البيئات، ولكن عادة ما تحطم الاضطرابات البيئية التطور المنتظم لمجتمعات الأحياء الدقيقة.

ويمكن التحكم في درجة الحرارة وتركيز المحاليل والغذاء وكثافة الضوء ومعايير أخرى لإيجاد موطن بمواصفات محددة، وقد صمم الكثير من النماذج التجريبية للنظام البيئي Experimental Ecosystem Models لدراسة الأحياء الدقيقة والعلاقات المتبادلة بينها والتأثيرات المتداخلة؛ لذا يتم استبعاد الكائنات الحية الأخرى في كثير من هذه النماذج، وإن التحكم في مكونات النظام البيئي يُمكِّن العلماء من ترجمة النتائج وتحديد الأدوار وتبسيط المفاهيم والتداخلات المعقدة، ويمكن من خلال نتائج هذه النماذج فهم العلاقات المتبادلة بين جماعات الأحياء الدقيقة المتنوعة وتحديد وظائفها المتداخلة على النطاق الضيق، ومن ثم يمكن الاستدلال بنتائج التجارب المخبرية لمعرفة ما يتم في واقع النظام البيئي في البيئة المحيطة، فربما أن القيم الحقيقية لكل من التجارب والنماذج الرياضية تقدم الأدوات الضرورية لتطوير فهمنا لوظائف النظام البيئي، والعوامل التي تتحكم في تدفق الطاقة خلال النظام البيئي ودور كل منها لتطور القدرة المتوقعة، وإن كلًّا من النماذج التجريبية والرياضية تمكن علماء بيئة الأحياء الدقيقة من اختبار الفرضيات مع الأخذ في الحسبان وظائف الأحياء الدقيقة في النظام البيئي والتداخل فيما بينها. ويلاحظ أن القدرة المتوقعة المتطورة في هذه النماذج تكون مفيدة خصوصًا في الأنظمة البيئية التي تدار بشكل جيد (Fuqua et. al. ,Burns et. al. 1999 .2001, Caplice & Fitzgerald 1999)

وإن وجود المختبرات المتطورة وابتكار أو تصميم نماذج الأنظمة الغذائية المتخصصة مثل نظام تدفق الطاقة ونظام باتش Batch system ونظام Situ model system كل هذه التقنيات الحديثة مكنت علماء بيئة الأحياء الدقيقة من الإدارة والسيطرة على كل من المكونات الحية وغير الحية في النظام البيئي، والتحكم فيها بعناية ما يتيح فهم كيف تتداخل مكونات النظام البيئي في عملها في منظومة مشتركة، فمثلًا في نموذج نظام باتش Batch system كما في الشكل (3-2) نجد أن المركبات الأحيائية والبيئات الغذائية المدعمة تضاف إلى نظام مغلق، وهذا النظام يستمر ذاتيًّا، عندما يكون هناك مدخلات مناسبة وطاقة إشعاعية وفي وجود الكائنات الحية الدقيقة ذاتية التغذية الضوئية داخل النظام المغلق.

الشكل (3-2): نموذج نظام باتش Batch system.

لا شك أن مثل هذه النماذج التجريبية للنظام البيئي Experimental Ecosystem Models يحاول العلماء من خلالها تبسيط التداخل المعقد بين جماعات الأحياء الدقيقة وبين المجتمعات الميكروبية والبيئة، ولكن يجب أن نسأل عن كل نموذج ودرجة محاكاته للنظام البيئي الحقيقي وبعده وقربه من الواقع؟ وهل يمكن تعميم النتائج المتحصل عليها؟ وهل هي قابلة للتطبيق في البيئة الطبيعية، أم أن هذه النماذج تعطي فقط نتائج في الأنظمة البيئية الدقيقة Microecosystems أو قد تسمى Microcosms أي داخل المختبر وبعيدة عن الواقع؟

والحقيقة أنه على الرغم مما بذله الباحثون من جهود كبيرة في ابتكار مثل هذه النماذج، لكنها تظل اصطناعية، وينقصها الشيء الكثير مقارنة بما يتم في أرض الواقع داخل الأنظمة البيئية الطبيعية، على الرغم من أن النتائج المتحصل عليها من النماذج التجريبية للنظام البيئي يمكن الاستفادة منها في معرفة الأدوار التي تقوم بها الأحياء الدقيقة داخل النظام البيئي، وكذلك لهذه النماذج أهمية في تفسير بعض الظواهر البيئية وإعطاء مؤشرات ودلائل بيئية تقود إلى إدراك مدى التداخل والترابط القوي بين مكونات النظام البيئي الحية وغير الحية ودرجة تأثير وتأثر كل منهما في الآخر (et. al. 2006 Bloem).

وبشكل عام من الممكن القول: إنه بفهمنا لوظائف النظام نتوقع عواقب النتائج في أي جزء من النظام، ومن الجدير بالذكر أن النماذج التجريبية والرياضية طبقت في التخلص من الفضلات والتحكم في النفايات الممرضة الخطيرة، وفي المستقبل القريب محتمل أن تشهد النماذج التجريبية والرياضية زيادة في دورها التطبيقي البارز في دراسة بيئة الأحياء الدقيقة كما هي عليه الآن في البيئة العامة.

تقدير الأعداد والكتلة الحيوية للأحياء الدقيقة
Measurement of Microbial Numbers and Biomass

إن فهم تركيب ووظيفة النظام البيئي هي عملية في غاية التعقيد، وتعتمد ليس فقط على معرفة العلاقات المتداخلة بين مكوناته المتنوعة والمتعددة، بل يحتاج الأمر إلى معلومات كمية عن أعداد الكائنات الحية والكتلة الحيوية ومعدل الأنشطة ومعدل النمو والموت ودورات تحلل المخلفات وإعادة بنائها ومعدل النقل وتحولات الطاقة خلال النظام البيئي، وهذا المدخل الكمي علاوة على أي شيء آخر هو ما يميز علماء البيئة عن غيرهم من علماء الطبيعة، وفي هذا الفصل سوف يتم استعراض كيف تمكن علماء بيئة الأحياء الدقيقة من دراسة وتقدير كمية المكونات الميكروبية في النظام البيئي، والوسائل المستخدمة في هذه التقديرات هي طرق دقيقة في تحديد بيئة الأحياء الدقيقة كقواعد علمية (et. al. 2006 Bloem).

وتمثل الأعداد الكلية للأحياء الدقيقة والكتل الحيوية والأنشطة الميكروبية المعايير البيئية Ecological parameters، وهي مرتبطة ببعضها؛ لذا فإن هذه المعايير ينبغي ألا تستخدم في التغيرات المتداخلة البسيطة، والتحكم في طبيعة المشكلة البيئية هو أكثر شيء مناسب يمكن تقديره، وفي بعض الأحيان تستخدم التقنية لقياس معيار أقل صلة مثل الأرقام، ولحساب معيار أكثر صلة مثل الكتلة الحيوية، وأيهما استخدم فإنه ينبغي التقييم بعناية للوضع البيئي في المنطقة أو النظام البيئي المراد دراسته.

إنها تقوم على سبب يقول: إن التغيير في الأعداد الكلية للأحياء الدقيقة عادة ما يكون مرتبطًا بتغيير مماثل في الكتلة الحيوية والأنشطة الميكروبية، طالما أن مثل هذه العلاقة تمثل تقييمًا ذاتيًّا، فإنه ينبغي أن يكون أحد هذه المعايير البيئية في حالة استعداد عندما تكون إما غير متناسبة أو غائبة كليًّا، وقد يتغير حجم خلايا الكائنات الحية بناءً على دورات الحياة أو وفرة المعادن، وفي مثل هذه الظروف قد تزداد أو تقل الكتلة الحيوية للكائنات الحية دون تغير مماثل في أعداد الكائنات الحية، وكذلك الحال بالنسبة إلى الجراثيم الفطرية أو الأكتينوميسيتات قد تزداد أعدادها بشكل مثير مع تغير طفيف

أو معدوم في الكتلة الحيوية، ويلاحظ أن الأنشطة الميكروبية ترتبط بالكتلة الحيوية وأعداد الكائنات الحية الدقيقة فقط، عندما تكون الظروف البيئية ثابتة، فأي تغير في درجة الحرارة أو وفرة الغذاء أو أي من العوامل البيئية الأخرى سوف يغير الأنشطة الميكروبية من دون تغير ضروري في الأعداد أو الكتلة الحيوية، وتشير الأبحاث إلى أن علماء الأحياء الدقيقة في حاجة إلى تقييم هذه المعايير بدقة ودراسة كل حالة على حدة (الفالح 1426هـ).

وإن عد الأحياء الدقيقة في أنظمة الطبيعة يعني تقدير العدد الكلي لهذه الأحياء الدقيقة أو عدد محدد لعينات ممثلة يتم تحليلها، وتستخدم بدلًا عن المجتمع الكامل أو النظام البيئي، ومصطلح العينات الممثلة Representative samples يعني أن العينات يجب أن تعكس التنوع والكثافة للكائنات الحية في عموم البيئة المدروسة، وفي كثير من البيئات يكون توزيع الأحياء الدقيقة غير متجانس، ولكن يكون بشكل متفاوت patchy، وأي عينة مفردة هي من الأهمية بمكان لوصف ومقارنة البيئة عامة، وتقود إلى التقدير الحقيقي للوفرة.

وهذا صحيح إلى حد ما من أجل أن الأحياء الدقيقة تعيش في مواطن دقيقة لا يمكن تمييزها في أثناء وقت تجميع العينات. وهذا لتقليل نسبة الخطأ، فإنه يتم تحضير مركب العينات بواسطة تجميعها منفردة باستخدام شبكة عينات sampling grid مناسبة. وينبغي تطبيق الأسس الإحصائية المعروفة لتشمل جميع العينات المأخوذة من البيئة المراد دراستها، ومن الأهمية بمكان أن نفهم أن كل تقدير يقوم على ثلاث مراحل رئيسة تشمل تجميع العينات sample collection وتحضير العينات sample processing والقراءة الصحيحة لها actual measurement، فأسلوب أخذ

العينات وتحضيرها يوثر بلا شك فيما يأتي من تقديرات لاحقة لهذه العينات، فمن أجل ذلك ينبغي مراعاة جميع هذه المراحل وأخذها في الحسبان عند ترجمة النتائج المتحصل عليها.

تجميع العينات Sample Collection

يجب استخدام مداخل عدة لأخذ عينات الكائنات الحية الدقيقة من أنظمة بيئية مختلفة مثل روث الأغنام وسطح التربة وماء البحيرة والرواسب البحرية العميقة. وغياب الوصول المباشر إلى بعض البيئات ولد الاحتياج إلى أدوات عينات التحكم عن بعد، وفي بعض خطوات العد تكون مراحل أخذ العينات وحتى خطوات العد مرتبطة بالعينات نفسها، وتقدر طريقة الحصول على العينات وفق الخصائص الفسيولوجية والكيميائية للنظام البيئي المراد دراسته، وذلك من خلال وفرة الكائنات الحية الدقيقة وعد أو خطوات التقدير لتنفيذها.

أي إن هناك وسائل عدة لأخذ العينات تختلف باختلاف البيئات المتنوعة، ويجب التأكد خلال عملية أخذ العينات أن أعداد وأنشطة الكائنات الحية الدقيقة لم تتبدل سواءً سلبًا أو إيجابًا في غير الكمية، ويجب التأكد أن العينات ممثلة لجميع النظام البيئي، وغير ملوثة بكائنات حية دقيقة خارجية، والتأكد من أن الأحياء الدقيقة أتت فقط من النظام البيئي المراد دراسته، ويبين الجدول الآتي رقم (3-1) مقارنة توضح نسب أعداد وجود عينات الأحياء الدقيقة في أهم البيئات الطبيعية (Atlas and Bartha 1993).

جدول (3-1): مقارنة وجود عينات الأحياء الدقيقة في أهم البيئات الطبيعية.

البيئة	أخذ العينات	الأعداد	أدوات العينات	مراحل العينات
هواء	مباشر	منخفضة	مرشحات، ترسيب	تركيز في المرشحات
ماء	مباشر أو عن بعد	منخفضة أو عالية	شبكة، حاويات، مرشحات	التخفيف أو التركيز
رواسب	عن بعد	عالية	خطاف، قاطعة	سلسلة تخفيفات
تربة	مباشر	عالية	مجرفة، قاطعة	سلسلة تخفيفات

عينات التربة Soil Samples

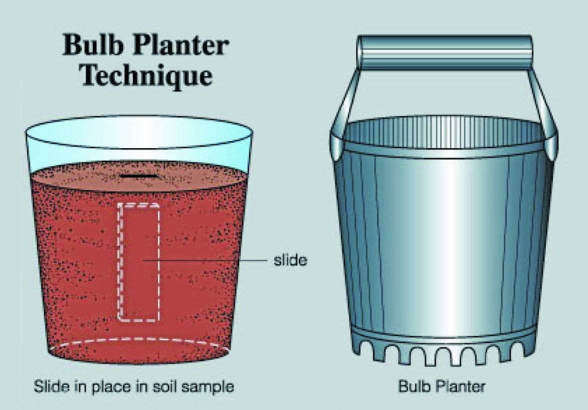
إن علماء بيئة الأحياء الدقيقة لا يستخدمون تقنية معقمة عند تجميع عينات التربة ولكن عمليًّا يعتمدون على المجرفة والجردل من أجل وفرة الأحياء الدقيقة في التربة وإمكانية التلوث من الهواء أو الحاويات غير المعقمة، ويستخدم قاطع التربة Soil corer عندما يجب أخذ التربة من عمق

محدد، فقاطع التربة يكون متدرجًا وله طرف قطع حاد في أسفله ومقبض يدوي في أعلاه؛ لتجميع عينات التربة على أعماق مختلفة كما في الشكل (3-3).

وقد صممت قواطع التربة لتقليل التراص بين طبقات التربة في أثناء استخراج العينات.

الشكل (3-3): أنواع مختلفة من قواطع التربة.

عملية أخذ عينات الأحياء الدقيقة في التربة لا بد من أن تكون متناسبة مع البيئة المراد دراستها، فالأعداد المنخفضة تتطلب استخدام الطعم أو الجاذبات لعزلها ودراستها، وفي بعض الحالات يكفي توفير سطح به تركيزات عالية من المغذيات الذائبة بشكل طبيعي بواسطة الامتصاص، وقد تم استخدام تقنية شريحة الطمر Buried slide technique بكثافة في أخذ العينات ومراقبة أعداد الكائنات الحية الدقيقة في التربة والرواسب (الشكل 3-4).



الشكل (3-4): شريحة الطمر مغروسة في التربة.

في هذه التقنية تغرس شريحة المجهر الزجاجي في التربة أو الرواسب، على افتراض أن سطح الشريحة الزجاجية غير انتقائي، ويكون مثل سطح الجزيئات المعدنية في التربة، وعمومًا يمكن اعتبار أن أنواع وخصائص الكائنات الحية التي سوف تلتصق بالشريحة تكون ممثلة لمجتمع التربة،

ومن التغيرات الحديثة التي طرأت على تقنية شريحة الطمر اكتشاف المجهر الإلكتروني وتطبيقاته في البيئات الطبيعية.

ومراقبة الإلكترودات المسترجعة بواسطة المجهر الإلكتروني تكشف تفاصيل أكثر لأشكال الكائنات الحية الدقيقة مقارنة بالمجهر الضوئي، ومن التغيرات الأخرى التي طرأت على تقنية شريحة الطفو اكتشاف استبدال الشريحة الزجاجية بزجاجة شعرية مستوية الطرف، تسمى Pedoscopes عندما تستخدم في التربة، وتسمى Peloscopes عندما تستخدم في الرواسب، والأنبوبة الشعرية تتغلغل في ثقوب وفراغات التربة والرواسب التي تُوجَد فيها الأحياء الدقيقة بحرية، ويوفر سطح الأنبوبة الشعرية مستوية الطرف مراقبة مجهرية وإمكانية العد للكائنات الحية الدقيقة بعد استرجاع هذه الأنبوبة الشعرية من داخل التربة أو الرواسب (Elsas et. al. 1997).

ويمكن تعبئة الأنبوبة الشعرية بمواد مغذية تجذب الكائنات لتتغذى عليها، وفي هذه الحالة تتوافر بيئة غنية تتكاثر فيها الأحياء الدقيقة بسرعة، وعندها فإن العينات لا تمثل المجتمع الحقيقي للبيئة المراد دراستها، وأهم الإنجازات التي تعزى لاستخدام تقنية الأنبوبة الشعرية في التربة ما يأتي:

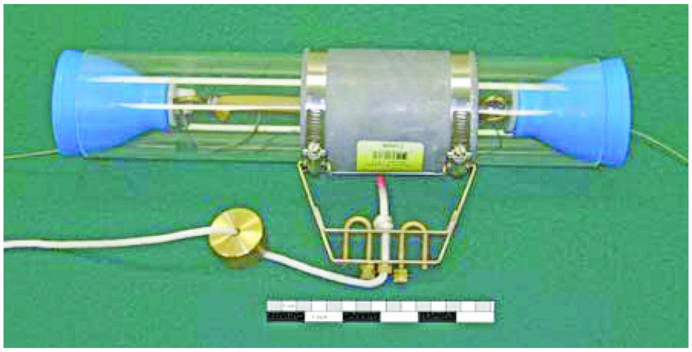
1. مراقبة انتشار وتوزع الأحياء الدقيقة في مادة السلت Silt مثل وفرة الطحالب والبكتيريا Caulobacter والأوليات السوطية.

2. عد الأجناس الجديدة التي بقيت غير معروفة بسبب خصائصها غير العادية.

3. مراقبة مراحل دورات الحياة في المواطن الطبيعية.

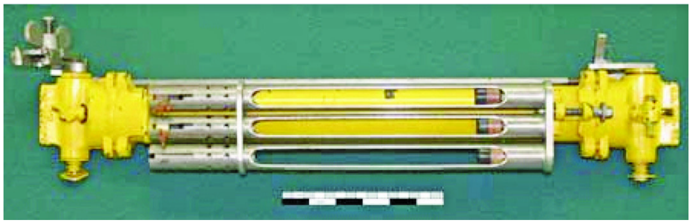
عينات الماء Water Samples

مشكلات تجميع العينات في البيئات المائية تكون أكثر مقارنة بالتربة، فالبيئات المائية تؤخذ عيناتها عن بعد وإمكانية التلوث فيها كبيرة وأعداد الكائنات الحية الدقيقة فيها قليلة، ويتم استخدام أدوات عدة لتجميع العينات من المياه والرواسب ولكل منها إيجابياتها ومحدوديتها، وبعض هذه الأدوات صممت للتأكد من أن العينات أخذت من موقع محدد، من عمق 50 مترًا مثلًا في البيئة المائية المراد دراستها وهكذا، وعادة تجمع عينات الماء لعد الطحالب أو الأوليات بواسطة قوارير عينات جهاز نانسن Nansen كما في الشكل (3-5).



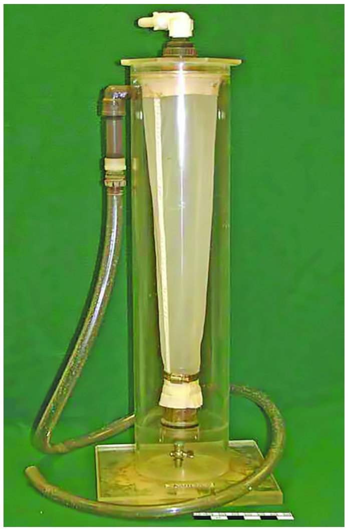
الشكل (3-5): جهاز Nansen لتجميع العينات من الماء.

ويمكن أخذ عينات الماء لعد الطحالب أو الأوليات بواسطة قوارير عينات جهاز آخر يستخدمه كثير من الباحثين يعرف بجهاز فان دورن VanDorn كما في الشكل (3-6). ومن الجدير بالذكر أن جميع هذه الأدوات غير مناسبة لدراسة البكتيريا؛ لأنها لا يمكن تعقيمها.



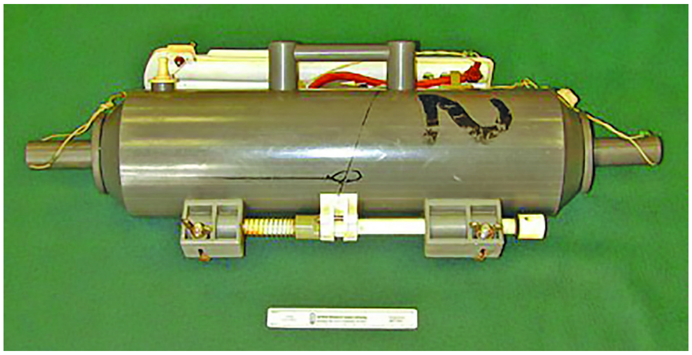
الشكل (3-6): جهاز VanDorn لتجميع العينات من الماء.

ويتم تجميع الطحالب في البلانكتون Planktonic بواسطة شبكات تسحب بواسطة القارب، ولكن كثيرًا من الكائنات الحية الدقيقة لن تبقى حية في مثل هذه الطريقة، إذ تنساب الكائنات الحية في العوالق المائية في قوارير التجميع، ومن ثم يمكن تركيزها (الشكل 3-7).



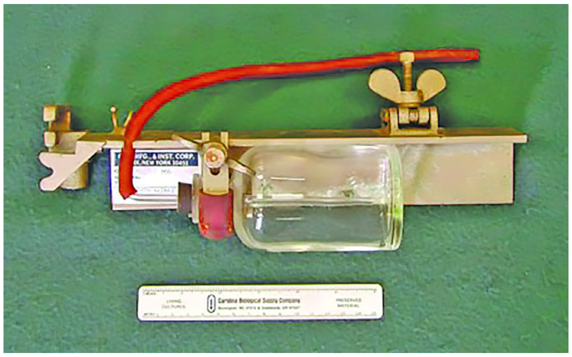
الشكل (3-7): شبكة لتجميع البلانكتون Planktonic.

بينما لتجميع العينات البكتيرية من البيئات المائية، فقد صممت غرف تفريغ خاصة Evacuated chamber يمكن فتحها في العمق المحدد حتى تمتلئ بالماء وما يحمله من بكتيريا، ولتفادي حدوث التلوث فقد تم تنويع الأدوات للتحكم في أخذ العينات من عمق محدد دون غيره، فهناك غرف مزودة بزجاجة دقيقة معقمة يتم سحبها عند العمق المطلوب، ثم تغلق بسرعة فائقة، وبعض غرف تجميع العينات المائية مزودة بأكياس معقمة تتحكم في كمية الماء والعمق وهكذا بهدف تقليل التلوث قدر الإمكان مثل حقيبة Niskin المعقمة الموضحة في الشكل (3-8).



الشكل (3-8): حقيبة Niskin المعقمة لتجميع عينات الماء.

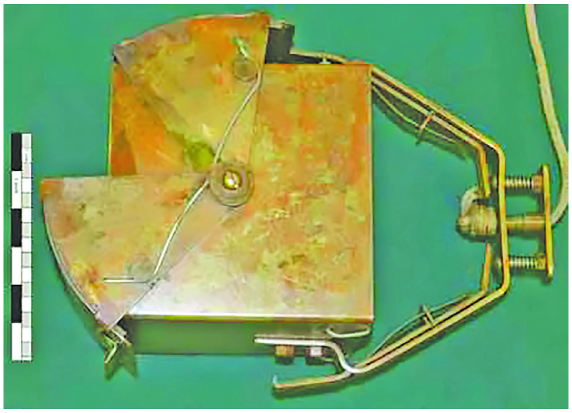
ومن أجل أنه يتم تنزيل أدوات تجميع العينات إلى أعماق مختلفة بعضها بعيدة لتصل إلى العمق المطلوب، ما يجعلها عرضة للتلوث، فقد تم تصميم أدوات خاصة بتجميع العينات البكتيرية من المياه العميقة جدًّا بما يتوافق مع الضغط العالي للماء في الأعماق، بحيث تكون مغلقة خلال مرورها في الماء حتى تصل إلى العمق المطلوب، ثم تفتح ليدخل الماء، وتغلق مباشرة تفاديًا للتلوث من أي مكان كما في الزجاجة الخاصة بتجميع العينات البكتيرية من الماء في وسط معقم الشكل (3-9).



الشكل (3-9): الزجاجة الخاصة بتجميع العينات البكتيرية Bacterialogical Bottle

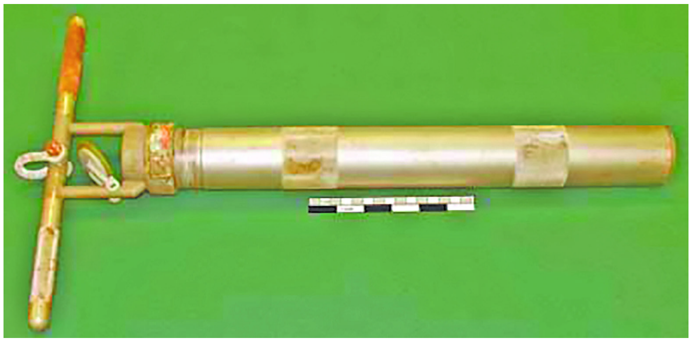
عينات الرواسب Sediment Samples

هناك تنوع في قاطع أو خطاف العينات التي تستعمل لتجميع عينات الرواسب من الأنظمة البيئية المائية، سواءً في المياه المالحة أو المياه العذبة، وخطاف العينات له فكّان محملان بزنبرك ينطبق عند ملامسة القاع (الشكل 3-10). ومن الجدير بالذكر أن تقنية الخطاف لا تمنع التلوث الذي تتعرض له العينات بسبب طمرها بالماء، وعادة ما يستخدم صندوق القواطع من قِبل علماء أحياء قيعان المياه، ونادرًا ما يستخدمه علماء الأحياء الدقيقة البحرية لاستخلاص الرواسب من مواطن راكدة.



الشكل (3-10): خطاف لتجميع العينات من قاع الماء.

وهناك أنواع من القواطع (الشكل 3-11) التي تستخدم لتجميع العينات من قاع الماء، سواءً أكان نهرًا أم بحرًا أم بحيرة، وتستخدم عينات القاطع لتجميع الرواسب للتحليل الميكروبي، ويجب أخذ الحذر لمنع ضغط العينة؛ حتى يُحمى التطبق الرأسي Stratification Vertical لمجتمع الكائنات الحية الدقيقة. قد يكون هناك خط معقم لأداة القطع يساعد على أخذ العينات، ويسمح بتقسيم عينات القطع إلى قطاعات رأسية.



الشكل (3-11): قاطع لتجميع العينات من قاع الماء.

وإضافة إلى أدوات تجميع العينات عن بعد تحت سطح الماء، فإن الغواصين قد يستعان بهم في بعض الأحيان في الغطس وتجميع عينات التحليل الميكروبي، وهذه الوسائل لجمع العينات تكمن

إيجابياتها في جعل من يقومون بجمع العينات يرون ما يجمعون، لتحديد قرار العلاقة بين ما يمكن جمعه وما يترك، ثم وصف العينات بكل وضوح من واقع بيئتها الأصلية في الطبيعة، وهناك غواصات متطورة مخصصة للغوص في أعماق المحيطات يتم من خلالها تجميع عينات من قاع المحيط، ثم تحضن، وتجرى عليها الدراسات والتحاليل الميكروبية في المختبر.

عينات الهواء Air Samples

إن عملية عزل عينات الأحياء الدقيقة من الهواء تحتاج إلى خطوات مرتبطة بعملية تجميع العينات، ومعلوم أن وجود الأحياء الدقيقة في الهواء قليل، وغير عملي أن نقوم بتجميع أحجام كبيرة من الهواء لإجراء تحاليل لاحقة؛ ولذلك فإن عينات الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في الهواء يتم تجميعها بإمرار تيار من الهواء معلوم حجمه خلال مرشح (Gregory 1973)، وتختلف أحجام الثقوب في غشاء المرشح باختلاف أنواع الأحياء الدقيقة المراد عزلها من الهواء، وفي جهاز أندرسون لعينات الهواء Andersen air sampler، يتم سحب الهواء وتمريره خلال سلسلة ألواح مثقبة بأحجام تصغر تدريجيًّا، ويتم وضع طبق آجار تحت كل لوح لتجميع الكائنات الحية الدقيقة والأجسام العالقة في الهواء التي تترسب على سطح الآجار، وتزداد سرعة الهواء مع زيادة صغر حجم الثقوب في اللوح؛ لذلك تزداد الجزيئات الصغيرة في السقوط على أطباق الآجار.

إعداد العينات Sample Processing

نادرًا ما يكون وجود الأحياء الدقيقة في البيئات المختلفة مناسبًا للتقدير والعد؛ لذلك يضطر الباحثون إما إلى تركيز العينات المأخوذة أو إلى تخفيفها؛ حتى تكون مناسبة للدراسة، فالعينات التي تكون فيها الأحياء الدقيقة موجودة بكثافة يجب تخفيفها من خلال سلسلة متدرجة من التركيزات حتى الوصول إلى تركيز تكون فيه أعداد الأحياء الدقيقة مناسبة، بينما يمكن تركيز العينات التي يلاحظ فيها أعداد قليلة من الكائنات الحية، وذلك إما بواسطة عملية الطرد المركزي أو بتمريرها على مرشحات مناسبة تحتجزها بأعداد كافية، وإن الطريقة أو الحالة التي يتم اتباعها في عملية إعداد العينات تؤثر بالتأكيد في الأعداد الحقيقية للأحياء الدقيقة التي يتم عزلها وتقديرها.

وإذا أردنا أن نصل إلى العدد الفعلي والحقيقي للكائنات الدقيقة الحية المرئية الموجودة في البيئة خلال أخذ العينات، فلا بد من إنجاز عملية الجمع والإعداد بسرعة؛ لأن الكائنات الحية الدقيقة معلوم أنها تنمو وتتكاثر في أوعية الجمع، وتزداد أعدادها مع مرور الوقت، وهذه المشكلة أو الظاهرة معروفة في قوارير وزجاجيات جمع العينات، وقد لوحظت تحديدًا مع ماء البحر الذي يفتقر بشكل طبيعي إلى سطوح الإدمصاص Adsorption خصوصًا عندما يوضع في قوارير زجاجية، فإن ما يحتوي عليه من مغذيات تتركز بفعل الإدمصاص على الجدار، فتصبح هذه العناصر الغذائية متاحة بشكل أكبر للأحياء الدقيقة الموجودة داخل الزجاج، ما يؤدي إلى نمو الميكروبات بشكل أكبر، فتتكاثر، وتزداد أعدادها (Atlas and Bartha 1993).

وإن الظروف التي تستخدم في أثناء عملية إعداد العينات وتجهيزها ممكن أن تتسبب في قتل كثير من الأحياء الدقيقة التي قد تكون موجودة بأعداد كبيرة في البيئة المراد دراستها، وإذا كان الأمر يستوجب تخفيف العينات من أجل عمليات العد المرئي المباشر، فلا بد من توزيع الأحياء الدقيقة بالتساوي في التخفيف النهائي، وهذه مهمة شاقة خصوصًا في عينات التربة والرواسب، حيث إن الأحياء الدقيقة تكون مرتبطة بالجزيئات الذائبة، وتعتمد كفاءة استخلاص الأحياء الدقيقة من الوسط الذي تعيش فيه بشكل كبير على جوانب عدة، تشمل المركبات الكيميائية وقوة الأسموزية للتخفيف ووقت الخلط ودرجة الحرارة والتركيب الكيميائي للموزع ودرجة التشتت، وتختلف عمليات الاستخلاص المثلى من عينات لأخرى، وتتطلب عيارية مطلقة للطريقة المتبعة.

وإذا كانت العينات تتطلب أن يتم تركيزها بالمرشحات، فلا بد من اختيار المرشحات المناسبة، فالمرشحات ذات الثقوب الواسعة غير مناسبة؛ لأنها لن تحتجز الأحياء الدقيقة صغيرة الحجم بل سوف تمر منها، والمرشحات ذات الثقوب الصغيرة جدًّا غير مناسبة كذلك؛ لأنها لن تسمح بمرور أحجام كافية من السوائل التي قد تتسبب في سد فتحاتها مع الاستعمال، وبشكل عام، فإن المرشحات عديدات الكربون Polycarbonate filters التي أنتجها Nuclepore تُعدّ ممتازة للمرشحات النيتروسليلوزية Nitrocellulose filters المنتجة بواسطة Millipore من أجل أنها مستوية السطح ومتماثلة الثقوب، وكذلك فإن التركيب الكيميائي للمرشحات يؤثر في حياة الكائنات الدقيقة وأعدادها.

ومن الواضح أن الظروف غير المناسبة للاحتياجات الفسيولوجية لمجاميع من الكائنات الحية الدقيقة سوف تقود إلى التأثير في أعدادها بموت الكثير منها تحت مثل هذه الظروف غير المواتية لنموها وتكاثرها، فمثلًا عزل الأحياء الدقيقة اللاهوائية الإجبارية Obligate Anaerobes يتطلب أن تُجرى جميع المراحل تحت ظروف لاهوائية، وإلا فلن نحصل على تقديرات صحيحة، وكذلك الحال بالنسبة إلى الأحياء الدقيقة المحبة للبرودة الإجبارية Psychrophiles Obligate يتطلب أن تتم مراحل عزلها ودراستها تحت ظروف باردة درجة حرارتها لا تتجاوز 20.

ومن الجدير بالذكر أنه عندما تكون طريقة العزل لا تفرق بين موت أو حياة الكائنات الحية، فإنه يمكن أن تضاف للعينات مادة الفورمالدهايد Formaldehyde أو مادة الجلوتارالدهايد Glutaraldehyde ومثل هذه التحضيرات تناسب طريقة العد المباشر تحت المجهر Direct Microscopic Observations.

أما عزل الفيروسات من البيئات الطبيعية فيتطلب إجراءات دقيقة خاصة ومتنوعة للحصول على الفيروسات بشكل مركز في العينات المراد دراستها وتحليلها، ويمكن تركيز الفيروسات في عينات الماء بواسطة عملية الإدمصاص المتكررة Repetitive Adsorption أو بعمليات التصفية التتابعية Elution Processes بعد عملية التحميض Acidification، حيث إن الفيروسات في

الأحجام الكبيرة من الماء يمكن إدمصاصها في زجاجيات شعرية Fiberglass أو مرشحات خاصة، وتختلف آلية عزل ودراسة الفيروسات من النبات عنها من الحيوان والإنسان وكذلك الفيروسات البكتيرية Bacteriophages حيث يتم عزلها بطريقة مغايرة.

تقدير العدد الكلي للأحياء الدقيقة
Determination of Microbial Numbers

تشمل المعايير الحيوية الأساسية Fundamental biotic parameters للنظام البيئي للأحياء الدقيقة كلًّا من الأعداد والكتلة الحيوية والأنشطة الأيضية؛ لذا فإن هناك حاجة ماسة لإيجاد طرق دقيقة وحساسة لقياس هذه المعايير، فمزيد من التقدم في تقنيات التحليل الميكروبي سوف تحسن من عمليات وخطوات هذه القياسات، وتقلل من التداخل بين نتائجها، حيث إن مصداقية النتائج المتحصل عليها من جراء هذه المعايير تُعدّ من الأهمية بمكان، فكلما قلت نسبة الخطأ في عمليات القياس زادت درجة المصداقية والدقة في النتائج، فمعلوم أن العد غير المباشر الكلي total viable count عادة ما يعد فيه 1% من مجتمع الأحياء الدقيقة في المكان المراد دراسته.

ولو طُرِح سؤال عن عدد الأحياء الدقيقة في مزرعة بكتيرية نقية، فإن الإجابة قد تكون سهلة إلى حد ما، ولكن عندما يكون السؤال عن مجتمعات مختلطة من الكائنات الحية الدقيقة في عينات بيئية، فلا شك أن الإجابة معقدة إلى درجة كبيرة، ما يتطلب استخدام تقنية صحيحة متقدمة تختار بعناية لتعطي نتائج ذات مصداقية عالية يمكن الاعتماد عليها في تفسير علاقة بيئية أو الإجابة عن مثل هذا السؤال بشكل مباشر وصحيح، وتختلف الأحياء الدقيقة اختلافًا كبيرًا عن بعضها؛ لذا فإن الطريقة المستخدمة في عد مجموعة من الأحياء الدقيقة غير مناسبة لعد مجموعة أخرى، فلكل مجموعة طريقة في العد خاصة بها تناسبها وحدها، فطريقة عد الفيروسات التي ذكرها (Primrose et al. 1982)، تختلف عن طريقة عد البكتيريا (Herbert 1982)، وطريقة عد الفطريات (Parkinson 1982)، وكذلك عن طريقة عد الطحالب (Round 1984)، إضافة إلى أن هناك اختلافًا في بيئة العزل من كائن حي لآخر، ويجب اختيار تقنية محددة لعد مجموعة فسيولوجية محددة، مثل البكتيريا اللاهوائية أو البكتيريا المحبة للبرودة وهكذا، وإن عملية عد مجموعة محددة من الأحياء الدقيقة تحتاج إلى طريقة جمع عينات وتحليل خاصة بها تتناسب مع خصائصها الفسيولوجية والتركيبية، وإنه يجب استخدام معيار محدد لتمييز وعد نوع معين من أنواع الكائنات الحية الدقيقة مثل بكتيريا القولون *Escherichia coli* التي تستخدم بوصفها مؤشرًا في اكتشاف وجود التلوث بمياه الصرف الصحي، حيث يتم الكشف عن وجود بكتيريا القولون في الماء بإجراء اختيارات عدة متتابعة تعتمد على دراسة الخصائص الفسيولوجية، ومنها قدرة هذا النوع من البكتيريا على إنتاج غاز في الوسط الذي تعيش فيه، إضافة إلى ذلك هناك المواصفات الظاهرية في الشكل الخارجي أو ما يعرف بالخصائص المورفولوجية لبكتيريا القولون.

وينبغي أن تبدأ عملية العد بتحديد أي من الكائنات الحية الدقيقة يراد عده، وهل العد سيكون لجميع الأحياء الدقيقة أم سوف يقتصر على مجموعة بعينها، ثم هل تستخدم نتائج العد أو تحول لتقدير الكتلة الحية، وما خصائص المكان المراد دراسته، والحقيقة أنه ليس هناك طريقة عامة يمكن تطبيقها أو استخدامها لتشمل جميع الأحياء الدقيقة وكل المواطن البيئية، فتنوع الأحياء الدقيقة وخصائصها ومواطنها وأماكن انتشارها تستوجب استخدام طرق عدة ومعايير مختلفة للحصول على نتائج دقيقة معبرة، وتمر عملية العد للأحياء الدقيقة بثلاث مراحل متتالية: أولها أخذ العينات، ثم تجهيز العينات، وأخيرًا العد الفعلي، ويجب استحضار جميع هذه المراحل وما تم فيها في أثناء ترجمة النتائج وتفسيرها، وهناك طريقتان أساسيتان يتبعهما الباحثون في عملية عد الأحياء الدقيقة: الأولى هي عملية الملاحظة المباشرة Direct Observation أو العد المباشر Direct Count Procedures والأخرى هي عملية عد غير مباشر Viable Count Procedures. ولكل طريقة منهما إيجابياتها الخاصة وخصائصها المحددة، وفي الغالب يتم حساب الأعداد من خطوات تقيس خصائص بيوكيميائية للأحياء الدقيقة، وهناك طرق عدة لدراسة وتقدير الكتلة الحيوية، وفيما يلي شرح مفصل لكل طريقة منهما:

أولًا: العد المباشر Direct Count Procedures

● طريقة العد الميكروسكوبي Microscopic count method

يمكن عد الأحياء الدقيقة بملاحظتها المباشرة تحت المجهر، وإن طريقة العد المباشر تعطي أعلى معدل لتقدير أعداد الأحياء الدقيقة، وعادة ما يتم توظيفها لحساب الكتلة الحيوية بطريقة غير مباشرة، وهناك عدد من العيوب الرئيسة تكتنف استخدام طريقة العد المباشر، منها عدم القدرة على التمييز بين الكائنات الدقيقة الحية والميتة، وصعوبة تقدير عدد الأحياء الدقيقة في عينات تحتوي على كميات كبيرة من بقايا ومخلفات الوسط الغذائي، إضافة إلى عدم القدرة على إجراء مزيد من الأبحاث والدراسات على الأحياء الدقيقة التي تمت ملاحظتها بطريقة العد المباشر، وبالنسبة إلى الأبحاث التي تستهدف دراسة الأعداد الكبيرة من الأحياء الدقيقة مثل الأوليات Protozoa والطحالب Algae والفطريات Fungi فإن طريقة العد المباشر تكون مناسبة جدًّا، ويتم ذلك باستخدام غرف العد Counting chambers (Finlay et al. 1979).

ولعد الكائنات الحية الدقيقة وحيدة الخلية يمكن استخدام غرف العد المتنوعة في أحجامها، مثل غرفة Hemocytometer أو غرفة Petroff-Hauser، وتتنوع البيئات الغذائية في غرف العد، ويتحكم فيها حجم العينة وخصائص الكائن الحي (Parkinson et al. 1971). وعادة ما يستخدم في الملاحظة المباشرة وعد الفطريات تقنية غشاء الآجار المعدلةA modified agar film technique (Jones and Mollison 1948). وفي هذه الطريقة يتم خلط العينات بمادة الآجار، ثم تشفط على شرائح زجاجية لتكون طبقة رقيقة، ويمكن صبغ غشاء الآجار بصبغة فينول الأنيلين

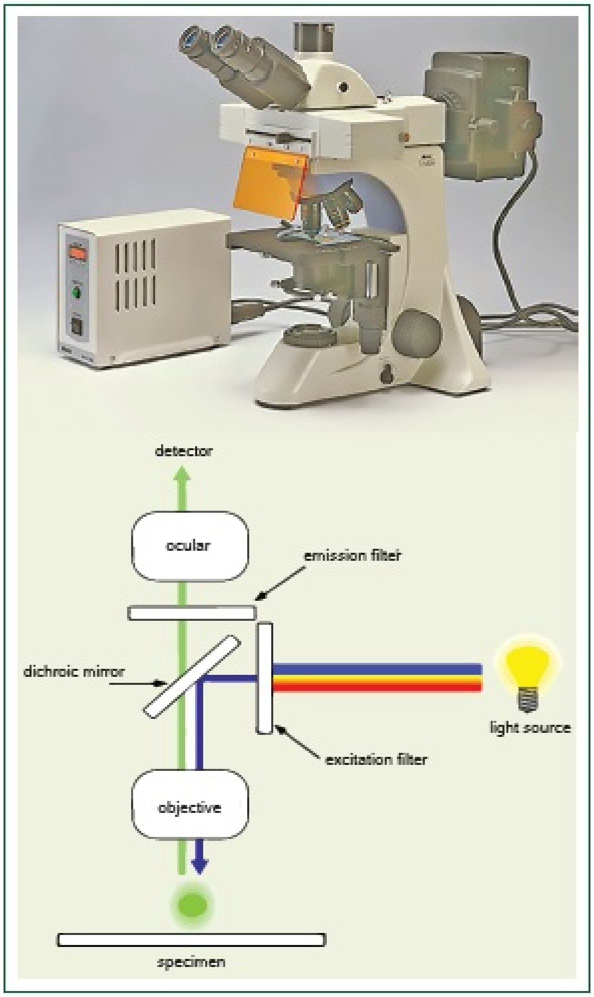
Phenolic aniline الأزرق، ثم تفحص الشرائح، ويقدر طول الغزل الفطري بحساب التداخلات مع شبكة متراكبة Superimposed grid.

وكبديل لاستخدام تقنية غشاء الآجار يمكن أن توظف صور الميكرسكوب على شاشة وتنسخ بالرسم، ويقاس طول الغزل الفطري بتمرير أداة قياس المسافة (مقياس الخرائط) على طول خط الرسم، وإذا تم قياس متوسط عرض الغزل الفطري للخيط فإنه يمكن حساب الكتلة الحيوية، ومن أبرز عيوب هذه التقنية أنه إن لم يتم تفريق الجزيئات بدرجة كافية، وإلا فسوف تختفي الخيوط الفطرية خلف دقائق التربة، ولا يمكن رؤيتها إلا بعد تكسير جزيئات التربة، وللتغلب على هذه المشكلة، فإن الأمر يتطلب إجراء سحق أو طحنًا نموذجيًّا واستخدام خلاط بسرعة عالية، ولتقدير الكتلة الحيوية للفطريات الحية فإنه يمكن أن تقترن تقنية غشاء الآجار لعد الفطريات بميكرسكوب فلوري باستخدام صبغة ثاني أسيتيت الفلوري Fluorescein diacetate. وفي هذه العملية لا تنصبغ فقط إلا الخلايا ذات النشاط الأيضي؛ لأن الفلوري يحدث فقط بعد الانشطار الأنزيمي لجزيء الصبغة؛ لذلك فإن استخدام صبغة ثاني أسيتيت الفلوري مرتبطة مع صبغة حيوية لا تميز بين الخيوط الفطرية الحية والميتة يسمح بتقدير كل من الكتلة الحيوية للفطريات الحية والكتلة الحيوية الكلية للفطريات، ومما يلاحظ من عيوب هذه الطريقة الخلفية الكبيرة للفلوري التي تحدث بسبب تحرر الإستيرويدات وتفاعلها مع الصبغ.

ويستخدم في الدراسات والأبحاث لعد البكتيريا وعلى نطاق واسع ما يعرف بالمجهر الفلوري الفوقي Epifluorescence microscopy الشكل (3-12). وذلك مع عدد من الصبغات مثل الأكريدين البرتقالي Acridine Orang (AODC) وكذلك تستخدم صبغة داي أميدين الفينول 4,6-diamidino-2-phenylindole (DAPI) إضافة إلى صبغة الثيوسيانيت الفلوري Fluorescein Isothiocyanate (FITC).

وعندما تستخدم صبغة الأكريدين البرتقالي، فإن خلايا البكتيريا والأحياء الدقيقة الأخرى تبدو لامعة باللون البرتقالي والأخضر، وهذان اللونان البرتقالي والأخضر مرتبطان بخصائص فسيولوجية للكائن الحي، ولا يمكن من خلال هذه الطريقة التمييز بين الخلايا الحية والخلايا الميتة للكائنات الدقيقة. وأما استخدام صبغة داي أميدين الفينول (DAPI) التي تصبغ الحمض النووي DNA للخلايا البكتيرية، وتظهر لونًا أزرق فلوريًّا قويًّا، فقد وجد أنها تكون رائعة لاستخدام صبغة الأكريدين البرتقالي لرؤية الخلايا البكتيرية الصغيرة.

(Winter & Behnken 2011, Stainer et. al. 1986, Sturino & Klaenhammer 2006, Tiwari & Lata 2018).


detector
ocular
emission filter
dichroic mirror
light source
excitation filter
objective
specimen

الشكل (12-3): المجهر الفلوري الفوقي Epifluorescence microscopy.

تشير الدراسات (Drucker 1987, Dyess et. al. 1985, Entian & de Vos 1996, Faith et. al. 2011) إلى أن نتائج عد الأحياء الدقيقة المباشر المتحصل عليها باستخدام المجهر الفلوري الفوقي Epifluorescence microscopy تكون أكبر بكثير من المتحصل عليها بواسطة طرق العد غير المباشر مثل تقنية المزارع وغيرها كما في الشكل (12-3)، حيث يتم ملاحظة وعد كثير من الأشكال البكتيرية الصغيرة وغير العادية بواسطة المجهر الفلوري الفوقي Epifluorescence microscopy. وهذه الأشكال يستحيل في الغالب زراعتها في بيئة المختبر، وعلى الرغم من ذلك فإنه غير واضح هل هي بكتيريا معروفة متحللة؛ أي غير حية أو أنها لم تعرف خصائصها واحتياجاتها الفسيولوجية بعد، ويبين الجدول رقم (2-3)الآتي مقارنة بين عد الأحياء الدقيقة المباشر باستخدام المجهر الفلوري الفوقي Epifluorescence microscopy والعد غير المباشر بطريقة الأطباق المعروفة.

الجدول (2-3): مقارنة بين عد الأحياء الدقيقة المباشر باستخدام المجهر الفلوري الفوقي Epifluorescence microscopy والعد غير المباشر بطريقة الأطباق[1].

العينات	التربة		ماء البحر	
	عد مباشر	عد غير مباشر	عد مباشر	عد غير مباشر
أ	8 10×5.0	7 10×3.1	3 10×2.2	1 10×1.3
ب	9 10×1.1	7 10×6.2	4 10×8.2	2 10×7.6
جـ	9 10×2.0	8 10×1.7	6 10×1.3	4 10×2.1

إن الاختلافات بين العد المباشر وطريقة الأطباق تعكس ببساطة اختيار البيئة الغذائية وظروف التحضين المستخدمة ونسبة البكتيريا الحية إلى الميتة أو المصابة والأنواع المحددة في العينة، وتكمن قيمة التوجه نحو عد الأحياء الدقيقة المباشر باستخدام المجهر الفلوري الفوقي **microscopy Epifluorescence** في أنها طريقة تطبيقية تناسب التنوع في المواطن البيئية من دون تحيز للعد غير المباشر بطريقة الأطباق، وإنها تسمح بتقدير الأعداد الميكروبية في مواطن المياه المالحة والمياه العذبة والتربة والرواسب، وتستوعب التنوع الكبير في أحجام الجماعات والخصائص الفسيولوجية التي تحدث في هذه المواطن المختلفة، وإن طريقة العد المباشر تناسب الكتلة الحيوية، فمن خلال هذه الطريقة يمكن حساب الكتلة الحيوية. ولتقدير الكتلة الحيوية بدقة من خلال نتائج طريقة العد المباشر يجب قياس الأحجام الرقيقة لتحويل القراءات المتحصل عليها إلى قيمة تعبر عن الكتلة الحيوية.

ويمكن تقدير أعداد نوع محدد من الكائنات الحية باستخدام تقنية الأجسام المضادة الفلوري Fluorescent antibody techniques. وهذه التقنية محددة بدرجة كبيرة للأنواع المفردة من الأحياء الدقيقة، وتسمح بدراسة علم البيئة الذاتية التي تهتم بدراسة الأنواع مفردة في بيئاتها الطبيعية، وفي حال العينات الكثيرة، فإنه قد يُجرى تحليل آلي تلقائي على نتائج عد الأحياء الدقيقة المباشر باستخدام المجهر الفلوري الفوقي، وفي عام 1952م تم لأول مرة توظيف تحليل الصور لعد جزيئات الفحم المجهرية، وتم تطبيق تحليل الصور للمجهر الفلوري الفوقي بواسطة صبغة الأكريدين البرتقالي (AODC) Acridine Orang لعد بكتيريا الحليب (Pettipher and Rodrigues 1982)، وكذلك استخدمت صبغة DAPI لاكتشاف وعد بكتيريا البلانكتون Planktonic bacteria (Sieracki et al. 1985). وقد قارن الباحثون نتائج عد الأحياء الدقيقة التي يتم تقديرها بالتحليل المرئي بنتائج العد بواسطة تحليل الصور، فوجدوا من خلال الطرق الإحصائية أنهما يعطيان نتائج متساوية، وتعد طريقة تحليل الصور تقنية جيدة، وتعطي نتائج مناسبة خصوصًا في عينات التربة والرواسب، على الرغم من أن دقائق وحبيبات التربة قد تؤثر في

انعكاسات الضوء، وقد يصعب التمييز من خلال تقنية تحليل الصور بين بعض الأحياء الدقيقة في حال عدم وضوح الصورة، أو أن الإضاءة غير كافية، ومن الجدير بالذكر أن هذه التقنية تتطلب وجود كاميرا حساسة وبمواصفات خاصة تمكن من وضوح الكائن الحي في العينة المراد تحليلها دون تأثير الخلفية للمحلول الذي حضرت منه العينة.

من الواضح أن هناك طرقًا عدة مختلفة لاكتشاف البكتيريا في البيئة، وكلها تقوم على مبدأ العد المباشر للأحياء الدقيقة، والجدل الدائر منذ سنوات عدة بين العلماء والباحثين في أيهما الأفضل، وكل طريقة تقيس خاصية مختلفة للخلية الميكروبية، وهذه الخاصية ينبغي أن تؤخذ في الحسبان لتقييم الطريقة ومقارنتها بغيرها. وقد يكون من المناسب استخدام أكثر من طريقة لدراسة الأحياء الدقيقة في العينات المأخوذة من البيئة المراد دراستها، على الرغم من أنه ينبغي أن نفرق بين ما ينبغي عمله في التجارب البيئية، وما يمكن عمله في الواقع.

إن المنهجية المتبعة للتقديرات غير المباشرة من الأهمية بمكان لتحديد ما يناسب منها وفق الإمكانات المتاحة وظروف البيئة المراد أخذ عينات منها للتحليل والدراسة، وأصبح الآن معروفًا أن هناك عددًا من الأحياء الدقيقة تبقى حية في الطبيعة، ولم يعد بالإمكان زراعتها بتقنية الأطباق الشائعة الاستخدام في مختبرات الأحياء الدقيقة، فالأحياء الدقيقة التي لا يمكن زراعتها حتى الآن من الممكن أن تتكاثر، وتسبب الكثير من الأمراض للكائنات الحية الأخرى، التي من بينها الإنسان.

التقنية الأخرى المتبعة لتقدير أعداد البكتيريا وأنواع الأنشطة الأيضية الخلوية هي الرسم الإشعاعي الذاتي المرتبط مع مجهر الملاحظة المباشر، ففي هذه الطريقة يتم تحضين البكتيريا مع مادة معلمة بالأشعة، مثل الجلوكوز المعلم Tritiated glucose الذي يُجمع فيما بعد على المرشحات البكتيرية، ويُوضع في شريحة زجاجية، ويُغطى بمستحلب تصوير ضوئي، والنشاط الأيضي البكتيري مشع، ويمكن تعريفه بواسطة ذرات الفضة المظلمة حول الخلية.

ويمكن استخدام المجهر الإلكتروني بدلًا عن المجهر الضوئي في عملية العد المباشرة للكائنات الحية الدقيقة، ومن الممكن مقارنة نتائج العد المتحصل عليها باستخدام المجهر الإلكتروني، مع تلك المتحصل عليها بواسطة المجهر الفلوري الفوقي. ويجب الملاحظة بحذر عند استخدام تقنية المجهر الإلكتروني؛ بسبب احتمالية وجود بروز صناعي يؤثر في النتائج، وذلك عندما تكون النماذج مغطاة بمعدن لتزيد من التباين للملاحظة، وعندما توضع النماذج تحت فراغ عالٍ، فكلما زادت المغناطيسية، فإن عددًا من حقول الرؤية قد تكون ممسوحة، فتبدو بارزة قبل ملاحظة الكائنات الحية الدقيقة؛ لذا فإن الملاحظة بالمجهر الإلكتروني طبقت أساسًا على العينات الكثيفة طبيعيًّا أو على مجتمعات ميكروبية تم تكثيفها صناعيًّا (Marsh 1994, Ul-Islam et. al. 2016, Ullah et. al. 2017).

طريقة عد الجزيئات Particle count method

إضافة إلى ما ذُكر من طرق أعلاه لعد الأحياء الدقيقة في البيئات المتنوعة، فإن هناك ما يعرف بطريقة عد الجزيئات Particle count method، حيث يمكن استخدام عداد الجزيئات مثل عداد كولتر Coulter counter لتقدير أعداد الكائنات الحية الدقيقة مباشرة، ويقيس عداد كولتر أعداد الجزيئات في مدى حجم محدد وثابت، وما يجعل هذه الطريقة محدودية الفائدة هو أن عملية التحليل فيها لا تفرق بين الجزيئات الدقيقة غير الحية والكائنات الحية الدقيقة، بل يتم من خلالها عد جميع الجزيئات الدقيقة في العينة، سواءً كانت حية أو غير حية، وعلى الرغم من ذلك، فإن مما شجع الباحثين على الاستفادة من طريقة عد الجزيئات في تقدير العدد الكلي للأحياء الدقيقة، ظهور تقنية تحليل الصور المتقدمة الحديثة التي تسمح بالتمييز المحدد للأحياء الدقيقة في مركب العينات، وزيادة استخدام فارزات الخلايا في عد الأحياء الدقيقة.

ثانيًا: العد غير المباشر Viable Count Procedures

يتم العد غير المباشر للأحياء الدقيقة بطريقتين أو مسارين أساسيين هما: طريقة عد الأطباق، وطريقة العد الأكثر احتمالًا (MPN) Most Probable Number وتحتاج كلتا الطريقتين إلى توزيع الأحياء الدقيقة في وحدات تكاثر منفردة، وتُعدّ المراحل في جميع طرق العد المباشر اختيارية لأحياء دقيقة محددة، وتتنوع درجة الاختيارية باختلاف مراحل العد المباشر، وعند محاولة تقدير الكتلة الحيوية لإجمالي الكائنات الحية الدقيقة في النظام البيئي، فإن هذه الاختيارية تُعدّ سلبية، لكنها تسمح بتقدير الأعداد لأنواع محددة من الأحياء الدقيقة.

- **طرق عد الأطباق sPlate count method**

1. الزراعـــــة الاختياريـــــــة والتفاضليـــة للطـراز الظاهـــر

Selective and differential planting for phenotypes

تُنتقَد بشدة طريقة العد في أطباق الآجار، على الرغم من أنها واسعة الانتشار، وتستخدم على نطاق واسع لدى كثير من الباحثين في عد الكائنات الحية الدقيقة القابلة للنمو، خصوصًا البكتيريا، وتكمن المشكلة في سوء استخدام الطريق أو في سوء تفسير النتائج أو في كليهما معًا، وعلاوة على أن هذه الطريقة فشلت في الوصول إلى تقدير العدد الكلي على الرغم من محاولات كثير ممن يطبقونها في دراساتهم، ويتم توظيف بيئات غذائية وظروف تحضين متنوعة في خطوات أطباق العد، وفي الغالب يُستخدَم الآجار لصلابة البيئات الغذائية؛ وذلك لأن معظم الأنواع البكتيرية تفتقر إلى الأنزيمات الضرورية لإعادة بلمرة مادة الآجار، وتوزع تخفيفات العينات على سطح الآجار وفق ما يعرف بالانتشار السطحي (Surface spread method) أو يخلط معلق العينات مع الآجار قبل صب الأطباق وفق ما يعرف بعملية أطباق الصب (Pour plate method). ويجب مراعاة مدى إمكانية الأحياء الدقيقة على البقاء حية مع خطوات العزل بهذه الطريقة، فبعض الأحياء الدقيقة

يموت عند تعرضه للهواء في أثناء عملية التوزيع على السطح في أطباق الآجار، وهناك أنواع أخرى تموت بسبب عدم تحملها للحرارة المطلوبة لإذابة الآجار في عملية أطباق الصب، ويتم في بعض الأحيان استبدال الآجار بمادة تصلب أخرى في حال تلوث الآجار بمواد عضوية، وإن جل السيليكا Silica gel قد يستخدم لتصلب البيئة الغذائية بدلًا عن الآجار، وذلك في حال عد مجاميع غذائية محددة من الكائنات الحية الدقيقة، ونظرًا لصعوبة تحضير أطباق جل السيليكا، فإنها لا تُستخدَم إلا في حالة الضرورة أو الحاجة الماسة إليها.

إن طريقة أنبوبة اللف Roll-tube method التي تُستخدَم لعد الأحياء الدقيقة الهوائية الإجبارية Obligate anaerobes microorganisms تُعدّ امتدادًا لطريقة صب الأطباق، وتحضن الأنابيب أو الأطباق تحت ظروف محددة لمدة معلومة من الوقت تسمح للبكتيريا بالنمو والتكاثر وتكوين مستعمرات مجهرية يتم عدها فيما بعد، ويُفترَض أن كل مستعمرة تكونت نتيجة نمو خلية مفردة في البيئة الغذائية، وتمشيًا مع هذه الفرضية، فإنه يجب نشر البكتيريا في الآجار أو عليه، فالأطباق المزدحمة بالمستعمرات لا يمكن عدها بدقة من أجل أن المستعمرة الواحدة تمثل أكثر من خلية أصلية من البكتيريا، وفي المقابل يجب استبعاد الأطباق التي بها عدد قليل من المستعمرات؛ وذلك لأسباب رياضية إحصائية، وهناك أمور أساسية يجب مراعاتها في أثناء عمل خطوات عد الأطباق، وهذه الأمور تشمل تركيب البيئة الغذائية وظروف التحضين ومدة التحضين.

ويجب أن تحتوي البيئة الغذائية لعد الأحياء الدقيقة غير ذاتية التغذية Heterotrophs التي لا تثبت النيتروجين الجوي على مصدر كربوني ونيتروجين وفوسفور، وما تحتاج إليه من كاتيونات وأنيونات مثل الحديد، والمغنيسيوم، والصوديوم، والكالسيوم، والكلور، والكبريت، ولم يتضح للباحثين حتى الآن السبب الحقيقي الذي يفسر لماذا تحتوي بيئات معينة من نظام بيئي محدد على العدد الأكبر من الأحياء الدقيقة، ويبدو أن البيئة الغذائية في مثل هذه الحال وفرت احتياجات غذائية وعوامل نمو مثالية، وبشكل عام فإن البيئة وفرت عناصر غذائية بتركيزات أعلى بكثير من تركيزها الموجود في البيئة الطبيعية أو النظام البيئي الذي جمعت منه العينات للتحليل والدراسة، بل إن تركيزات بعض العناصر الغذائية في البيئات الصناعية تكون عالية جدًّا إلى درجة أنها قد تصل إلى حد السمية لبعض الكائنات الحية الدقيقة في الطبيعة (Presscott et. al. 1999, Raaijmakers et. al. 2002).

والإيجابية الحقيقية لخطوات العد الحي Viable enumeration في مثل هذه الطرق، تكمن في أنه يمكن التحكم في احتياجات النمو وظروف التحضين؛ لكي لا تسمح إلا بنمو وعد مجموعة محددة دون غيرها من الكائنات الحية الدقيقة، ويمكن التحكم في تركيب بيئة عد الأطباق لتكون اختيارية أو تفاضلية، فصُمِّمت خطوات عد الأطباق الاختيارية Selective plate count لتكون مفضلة أو مناسبة لنمو المجموعة المرغوب فيها من الكائنات الحية الدقيقة دون سواها، وبذلك تكون احتمالية نمو المجاميع الأخرى مستبعدة إلى حد كبير بسبب مكونات البيئة الغذائية أو ظروف التحضين التي

لا تناسب إلا المجموعة المختارة من الأحياء الدقيقة، فتتكاثر بدورها، وتنمو، ويمكن عزلها ودراستها. وأما البيئة الغذائية التفاضلية Differential media فإنها لا تستبعد نمو أحياء دقيقة أخرى، ولكنها تسمح باكتشاف المجموعة المرغوب فيها بواسطة بعض الخصائص المميزة.

ويمكن تحضير البيئة الغذائية المناسبة لعد ودراسة فطريات مختارة، وأما طريقة عد الأطباق النامية Viable plate count technique فإنها بشكل عام ليست جديرة بالاختيار لعد الفطريات؛ وذلك من أجل أن هذه الطريقة تُفضَّل فقط لزراعة الفطريات غير الخيطية Nonfilamentous fungi والأبواغ Spores، على الرغم من أن طريقة عد الأطباق مناسبة لعد الخمائر وحيدة الخلية، وتضاف مثبطات البكتيريا Bacterial inhibitors للبيئة الغذائية؛ لمنع نمو البكتيريا على المستعمرات الفطرية، وذلك لأن وجود البكتيريا في العينات يفوق وجود الفطريات، فيتم عادة إضافة صبغة Rose bengal والمضادات الحيوية ستربتوميسين Streptomycin ونيوميسين Neomycin بوصفها مثبطات للنمو البكتيري، وأسهل إجراء لمنع النمو البكتيري هو خفض درجة الحموضة pH للبيئة الغذائية لتكون بين 4.5-5.5. ومعظم الفطريات لا تتأثر بهذه الدرجة من الحموضة، بينما تختفي معظم الأنواع البكتيرية بشكل كبير عند هذه الدرجة (الغنيم وآخرون 1996م).

تُعرَف البيئة الغذائية المعدة أو المحضرة بطريقة تسمح بنمو مجموعة محددة من الأحياء الدقيقة دون غيرها باسم البيئة الاختيارية Selective media، فعلى سبيل المثال هناك بيئة غذائية تعرف باسم Sabouraud dextrose agar تستخدم لعد الفطريات، وتعتمد أساسًا على درجة الحموضة المنخفضة والكربوهيدرات بوصفها مصدرًا للكربون، ولتنمية البكتيريا السالبة لصبغة جرام فإنه يتم إضافة كل من البنسلين Penicillin

أو أزرق الميثيلين Methylene blue التي تثبط نمو الأحياء الدقيقة الموجبة لصبغة جرام، ويمكن عد الأحياء الدقيقة المقاومة للمضادات الحيوية في البيئات الغذائية التي أضيف لها مضادات حيوية وهكذا، ويمكن تحضير البيئة الغذائية التفاضلية بطرق عدة، فقد تدمج المحاليل في البيئة الغذائية بما يسمح في الحال بأفضلية الظهور للبكتيريا المرغوب فيها، أو تضاف المحاليل بعد التحضين لاكتشاف البكتيريا المرغوب فيها، ومفتاح الإيجابية في البيئة الغذائية التفاضلية هو أن الخطوات تسمح بتمييز نوع واحد من بين الأحياء الدقيقة الأخرى الموجودة في العينة (Lynch and Hobbie 1988).

وتستخدم بشكل موسع بيئات غذائية اختيارية وتفاضلية هي Eosin methylene blue (EMB) agar وكذلك بيئة MacConkey’s agar لتقدير جودة الماء، وتُعدّ البيئتان بيئة اختيارية لنمو البكتيريا السالبة لصبغة جرام بدمجها مع مثبطات النمو للبكتيريا الموجبة لصبغة جرام، وتفاضلية للبكتيريا القادرة على استهلاك سكر اللاكتوز بتكوين مستعمرات ملونة متميزة، وعند تنمية بكتيريا

القولون Coliform السالبة لصبغة جرام والمستهلكة لسكر اللاكتوز على بيئة آجار EMB فإنها تعطي مستعمرة خضراء ذات لمعة معدنية، وعادة ما تستخدم تقديرات أعداد بكتيريا القولون المعزولة بهذه الطريقة بوصفها مؤشرات لجودة الماء ولجودة النوعية في الصناعات الغذائية.

2. تهجين المستعمرات Colony Hybridization

يُعدّ تهجين المستعمرات تطبيقًا لتهجين الحمض النووي الذي يرتبط مع خطوات الزراعة الحية وأخذ العينات الميكروبية البيئية المتعارف عليها، وإن المستعمرات البكتيرية أو صفائح الطور الخضري Phage plaques يتحول بعد مرحلة النمو التمهيدي من سطح المزرعة الغذائية إلى مرشحات التهجين، ثم تتحلل المستعمرات أو الطور الخضري المحتوي على صفائح بواسطة القلوية أو المعاملات الأنزيمية الذي بعده يحصل التهجين، وتعتمد هذه الطرق على مقدرة الكائنات الحية الدقيقة المستهدفة على النمو فوق بيئة العزل الأولية، ولا تغطى كلها بنمو جماعات غير مستهدفة، والنمو على بيئة العزل يزيد عدد النسخ للجين المستهدف إلى حد يسمح باكتشافه بواسطة مجس الجين Gene probe، وتم تطوير القاعدة الأساسية لهذه التقنية في عام 1975م بواسطة كل من الباحثين Grunstein and Hogness، وتبين أنها مناسبة لاستعراض الأطباق عالية الكثافة للمزارع النقية، فلو أن هناك مزرعة تحتوي على بكتيريا القولون E. coli غير مستهدفة وبكتيريا Pseudomonas putida مستهدفة، لأمكن باستخدام مجس البلازما TOL plasmid probe الكلي اكتشاف مستعمرة واحدة من P. putida تحتوي على التولين TOL من بين قرابة مليون مستعمرة من بكتيريا القولون في المزرعة نفسها. وبشكل عام، فإنه في مثل هذه التحاليل البيئية يجب سيادة الكائن الحي المراد دراسته في الجماعة، بما يضمن على الأقل وجود مستعمرة إيجابية واحدة في طبق الآجار المشتمل على مئة إلى ألف مستعمرة، ويمكن إجراء اختبار حساسية، بزراعة البكتيريا التي تم عزلها في آجار مناسب مختار قبل تهجين المستعمرة.

وفي خطوات تهجين المستعمرات يتم نقل خلايا البكتيريا النامية على البيئات الغذائية الحيوية إلى دعائم صلبة مناسبة مثل المرشح النيتروسليلوزي، وتتحلل، فيتحرر الحمض النووي DNA المتحول الذي يدمص إلى المرشح، ويتم بعد ذلك تحضين غشاء المرشح وDNA المرفق مع مجس الجين، ويحضر مجس الجين بعزل قطعة من المعلومات الوراثية وتعليمها إما بواسطة الفوسفور المعلم (p32)أو أي مادة أخرى مثل البيوتين Biotin. ويحدث التهجين إذا كان تتابع القاعدة في الخلية المتحللة يتوافق مع تتابع القاعدة في مجس الجين، وإذا كان تكون الهجين يمكن اكتشافه بواسطة رسم الإشعاع الذاتي Autoradiography لمجس الفوسفور المعلم والتطور الأنزيمي لمجس البيوتين المعلم. وفي هذه الطريقة، فإن البكتيريا ذات الخصائص الوراثية المميزة يمكن أن تكتشف بالتحديد، وعندما يكون طراز وراثي محدد موجودًا بأعداد قليلة مقارنة ببعض الجماعات، فإن طريقة التهجين DNA- DNA ينبغي أن تثبت فائدة مخصصة تساعد على اكتشاف جماعات محددة في العينات البيئية (O’Toole & Kolter 1998b, Pandey & Trivedi 1994).

ويمكن تهجين مجسات الجين بعزلات أولية من عينات البيئة، أو مع زراعة ثانوية لسلالات سبق وصفها، والتفسير المنطقي لتهجين المستعمرة المباشر على زراعة أولية يشتمل على الآتي:

أ. تجنب مخالفة الزراعة المنحازة بواسطة اختيار البيئة الغذائية، التي قد تقلل من الوفرة الكلية للطراز البيئي المعطى.

ب. ضمان وجود الطراز الجيني المعطى في عينات الجماعة، حتى ولو كانت الجينات ظهورها فقيرًا أو اختيارها فقيرًا.

ج. توفير ظروف نمو مثالية للأحياء الدقيقة المجهدة التي قد لا تزرع في البيئات المختارة.

د. تخفيض وقت التحليل للزراعة والكمية وتأكيد الطراز الجيني والطراز البيئي.

وعادة ما يُستخدَم تهجين المستعمرة على الزراعة الثانوية للمزارع النقية لتأكيد طراز جيني محدد أو لاختبار تتابع DNA مفرد لتطور مجس جين، وتتمثل الاستخدامات الرئيسة لطريقة تهجين المستعمرة في الدراسات البيئية في اكتشاف وعد وعزل البكتيريا مع طرز وراثية محددة أو طرز بيئية، وكذلك لتطوير مجسات الجين، فمن خلال تطبيق طريقة تهجين المستعمرة تم اكتشاف كائنات حية دقيقة مختلفة ذات نشاطات أيضية محددة لها أهمية بيئية في النظام البيئي، وقد تمكن عدد من الباحثين من تطبيق طريقة تهجين المستعمرة في دراسة المقاومة البيولوجية للمضادات الحيوية على عينات من المياه الجوفية، وتم استخدام هذه الطريقة في دراسات أخرى على الطراز الجيني، ووُجِد أنها أكثر دقة وحساسية لتحليل النفثالين Naphthalene degradation مقارنة بتحليل الأطباق المعياري، وفي المقابل تم استخدام تهجين المستعمرة مع العينات البيئية لعد البكتيريا المقاومة للزئبق في الأوساط البيئية الملوثة.

- **طريقة العد الأكثر احتمالًا (Most Probable Number (MPN**

استخدمت طريقة العد الأكثر احتمالًا Most Probable Number-MPN)) بوصفها بديلًا لطريقة عد الأطباق لتقدير الكائنات الحية الدقيقة، باستخدام تحليل إحصائي وتخفيفات متتالية من العينات للوصول إلى نقطة النقاوة للعينات، وتسجل مكررات التخفيفات بوصفها سالبة أو موجبة، وعادة تتراوح من ثلاثة إلى عشرة لكل تخفيف، ثم تُستخدَم العلامات السالبة والموجبة في الربط مع جدول إحصائي مناسب للحصول على العد الأكثر احتمالًا للأحياء الدقيقة، وتعطي خطوات طريقة العد الأكثر احتمالًا (MPN) تقديرًا إحصائيًّا لعدد الأحياء الدقيقة في العينة، وعندما تُستخدَم مكررات عدة تزداد درجة المصداقية في النتائج، ومن أبرز إيجابيات طريقة العد الأكثر احتمالًا لعد البكتيريا هو إمكانية استخدام البيئات الغذائية السائلة في عمليات العد، ما ساعد على عدم الحاجة إلى إضافة مادة تصلب البيئة مثل الآجار، ومن ثم تقليل احتمالية التلوث، ولكن بشكل عام يمكن القول:

إن طريقة العد الأكثر احتمالًا تبدو أكثر إرهاقًا وأقل دقة من عد الأطباق (Gupta et. al. 2005, Harriott & Noverr 2011, Cueto et. al. 2001).

ويُعدّ تحديد المعيار أساسيًّا للتفريق بين المكررات السالبة والموجبة، وفي كثير من الحالات يتم بناء اختبار العد الأكثر احتمالًا بطريقة تجعل زيادة العكارة (النمو) تلاحظ وتسجل على أنها موجبة، وفي بعض الاختبارات الأكثر توسعًا مثل تقدير البروتين

أو الكلوروفيل تحتاج خطوات أخرى إلى تسجيل أنابيب موجبة، كما هو الحال بالنسبة إلى خطوات عد الأطباق، فإن طريقة العد الأكثر احتمالًا يمكن أن تستخدم بيئات اختيارية وتفاضلية.

وإن طريقة العد الأكثر احتمالًا (MPN) المعدلة في عام 1946م بواسطة Singh تُستخدَم عادة لتقدير أعداد الأوليات Protozoa، وتطمر الزجاجة المتعددة أو حلقات البوليبروبلين Polypropylene في آجار كلوريد الصوديوم في أطباق بتري مكونة حفرًا، ثم يحقن سطح الآجار بمعلق بكتيري كثيف مثل بكتيريا aerogenes Enterobacter، وتحقن تخفيفات من العينات البيئية في هذه الحفر، فتتغذى الأوليات الموجودة في العينات على عجينة البكتيريا مكونة منطقة شفافة واضحة تدل على زوال البكتيريا فيها، وتسجل كل منطقة شفافة على أنها أعطت نتيجة موجبة، والمنطقة المعتمة التي لا تزال غنية بالبكتيريا تسجل سالبة.

ويمكن استخدام طريقة العد الأكثر احتمالًا (MPN) في تقدير الفيروسات الداخلية، حيث يتم في هذه الطريقة تحضير سلسلة من التخفيفات للعينات التي تحتوي على فيروسات، وتضاف إلى أنابيب اختبار بها خلايا عائل مناسب في مزرعة أنسجة، وبمتابعة التحضين يتم اختبار الأنابيب لتأثير الإصابة الخلوية (Cytopathic effect (CPE، وهذا هو موت الخلايا المصابة، ويمكن تقدير الكمية باستخدام جداول طريقة العد الأكثر احتمالًا (MPN) لتسجيل الأنابيب التي يظهر بها موت الخلايا بوصفه نتيجة موجبة والأنابيب الأخرى التي لا يلاحظ بها تأثير CPE تُعدّ سالبة، وكذلك يمكن تقدير عدد الفيروسات في العينات وفق ما يعرف بمقدار 50% جرعة زراعة النسيج المصاب Tissue culture infectious dose-50% ((TCID50، أقل تخفيف من المعلقات الفيروسية الذي يسبب إصابة خلوية في نصف الأنابيب.

وكما هو الحال في عملية عد الأطباق، فإنه يمكن خلال خطوات طريقة العد الأكثر احتمالًا التحكم وضبط البيئة الغذائية وظروف التحضين، وذلك لتحقيق ما يناسب مجاميع محددة من الأحياء الدقيقة أو لتمييز كائنات حية بخصائص معينة مرغوب فيها خلال الدراسة البيئية، ومن الواضح أن توحيد ظروف التحضين والبيئة الغذائية التي يمكن استخدامها لعد مجاميع محددة من البكتيريا هي عملية غير محددة، وكل خطوة في مراحل التحليل يجب اختيارها بعناية، وتختبر لتسمح بالتفسير الصحيح للنتائج.

التقنيات المستخدمة في التحليل الميكروبي للهواء

تُوجَد الأحياء الدقيقة في الغلاف الجوي المحيط بالكرة الأرضية، وتزداد كثافة الأعداد الميكروبية كلما اقتربنا من سطح الأرض؛ أي في الغلاف الحيوي، وعلى الرغم من أن أعداد الأحياء الدقيقة في الهواء أقل بكثير منها في التربة والماء بحكم تغير الظروف البيئية وتعرضها لمؤثرات أكبر وقلة توفر الغذاء، ولكنها تشكل مجتمعات ميكروبية ذات خصائص مميزة تسمى فلورا الهواء الميكروبية Air microflora، وتتم دراسة كمية الكائنات الحية الدقيقة الموجودة بالهواء، إما بإمرار الهواء على وسط غذائي مناسب أو إمراره في ماء معقم، ثم حقن كمية مناسبة من هذا الماء في وسط غذائي مناسب للنمو، (Forbes et. al. 1998) ومن الطرق المستخدمة في هذا الصدد ما يأتي:

1. طريقة الأطباق المكشوفة Exposed plate technique

في هذه الطريقة تُستخدَم أطباق بتري التي تحتوي على وسط غذائي مناسب، ويرفع غطاء الطبق، ويمرر فوقه الهواء المطلوب تحليله لعدة دقائق، ثم يحفظ عند درجة حرارة مناسبة، وتفحص المستعمرات الميكروبية النامية بعد ذلك، وهذه الطريقة وصفية فقط؛ أي يمكن عن طريقها معرفة أنواع الكائنات الحية بالهواء، وليست طريقة كمية؛ أي لا يتم في هذه الطريقة حساب أعداد الأحياء الدقيقة من حجم معين من الهواء.

2. جهاز القمع The Funnel device

تتلخص هذه الطريقة في سحب الهواء من خلال ساق قمع زجاجي عن طريق مضخة تفريغ مثبتة أعلى وحدة السحب، حيث يقابل الهواء الداخل طبق بتري عند فوهة القمع يكون فيه منبت غذائي مناسب، ويمكن حساب حجم الهواء المسحوب عن طريق جهاز فلوميتر Flow meter.

3. جهاز القرص المثقوب The sieve swirler

هذا القرص عبارة عن علبة من المعدن سطحها العلوي مثقب يدخل منه تيار من الهواء المراد تحليله ميكروبيًّا، ويمر على طبق بتري به وسط غذائي مناسب، ثم يخرج الهواء من الجهة الأخرى، ويمكن أيضًا قياس حجم الهواء بالطريقة نفسها المستخدمة في جهاز القمع.

4. طريقة المرشحات البكترية Bacterial membrane filters

يتم في هذه الطريقة تمرير الهواء المراد تحليله على غشاء من نوع خاص يسمح بمرور الهواء فقط، وأما الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في الهواء فتحتجز على الغشاء البكتيري، ثم يوضع الغشاء فوق قرص من الورق مشبع بوسط غذائي مناسب، ثم يحضن عند درجة حرارة مناسبة، ويتم بعد ذلك فحصه مجهريًّا لمعرفة ما يحويه من كائنات حية دقيقة احتجزها؛ لأن حجمها أكبر من فتحات المرشح.

5. جهاز فحص الهواء Aeroscope

يتم في جهاز فحص الهواء إمرار الهواء في سائل من وسط غذائي مناسب أو ماء معقم، بحيث يخرج من الجهة الأخرى تاركًا ما به من كائنات دقيقة في السائل الذي يؤخذ بدوره ويحضن أو يحقن في حيوانات التجارب طبقًا لنوع الفحص المطلوب، وفي هذا المجال ينبغي أن نفرق بين نوعين من الهواء، هما: الهواء داخل البيوت Indoor air، والهواء خارج البيوت Outdoor air. وكلاهما يحتوي على كثير من الكائنات الحية الدقيقة، وتختلف في كمياتها وأنواعها، ويتأثر المحتوى الميكروبي للهواء داخل البيت على درجة التهوية، وعدد الأشخاص، وحالتهم الصحية... إلخ، وأما الهواء خارج البيت فيكون متنوعًا، ويختلف من مكان إلى آخر على اليابسة أو فوق الماء.

ويمكن أن تتم تنقية الهواء في المنازل أو المستشفيات أو معامل البحوث بطرق عدة، منها ما يأتي:

أ) الأشعة فوق البنفسجية Ultra violet

تستخدم الأشعة فوق البنفسجية في تنقية الهواء من الأحياء الدقيقة العالقة به، سواءً كانت غير ممرضة أو مسببة للأمراض Air borne diseases، وللأشعة فوق البنفسجية أثر كبير في البكتيريا، ولكن يجب اتخاذ الاحتياطات اللازمة عند استخدامها لتوفير الأمن والسلامة، فينبغي مراعاة حجم المكان وقوة الأشعة وطولها وزمن التعريض وحركة الهواء في المكان... إلخ.

ب) استخدام الكيماويات

من أهمها الهيبوكلورات Hypochlorites والجليكولات Glycols، وتستخدم هذه الكيماويات في صورة أبخرة ترش في الهواء، وتؤثر في الكائنات الحية الدقيقة الموجودة به، وتعرف باسم الدقائق المعلقة في الهواء Aerosols وينبغي أن يتوافر في هذه المركبات شروط عدة لتكون صالحة للاستعمال، من أهمها أن يكون أثرها مميتًا للبكتيريا، ولا تؤثر في الإنسان، وأن تكون سهلة الانتشار في صورة دقائق معلقة في الهواء، وتؤثر في البكتيريا في درجات الحرارة العادية والرطوبة، وفي الوقت نفسه لا تسبب تلوثًا أو إفسادًا أو إتلافًا لأي من متعلقات الإنسان.

جـ) ترشيح الهواء

يمكن تنقية الهواء على الرغم من كثرة الأحياء الدقيقة الموجودة فيه، فالهواء الجوي المحيط بنا غني بأنواع الميكروبات المختلفة، منها ما هو ممرض Pathogenic microorganisms ومنها ما هو غير ممرض Nonpathogenic microorganisms، حيث يتم ترشيح الهواء باستخدام مرشحات خاصة من أغشية سليلوزية كالقطن أو ألياف زجاجية، وعند مرور الهواء عليها، فإنها تحتجز ما به

من أتربه وكائنات حية دقيقة عالقة، وينبغي أن يمر الهواء بمعدل معقول، وحتى لا يتلف المرشح بسرعة ينبغي أن يتكون من طبقة خارجية من ألياف زجاجية تتبعها طبقة داخلية من ألياف القطن.

تقدير الكتلة الحيوية للأحياء الدقيقة
Determination of Microbial Biomass

يقصد بالكتلة الحيوية أي الكتلة الإجمالية للكائنات الحية، وتُعدّ الكتلة الحيوية أحد المعايير الحيوية الأساسية Fundamental biotic parameters للنظام البيئي للأحياء الدقيقة، ولا يمكن أن تكتمل دراسة أي نظام بيئي من الأنظمة البيئية سواءً على اليابسة أو الماء إلا بتقدير الكتلة الحيوية لهذا النظام أو ذاك. والكتلة الحيوية تعكس مدى الوجود الحيوي، وكثافة نشاط الأحياء الدقيقة المتوطنة في البيئة المراد دراستها، فكلما زاد عدد الكائنات الحية في منطقة من المناطق ازدادت معه الكتلة الحيوية، وعلى الرغم من سيادة نوع معين أو جماعة من الجماعات في المجتمع الحيوي فإن المحصلة النهائية التي تعبر عنها الكتلة الحيوية تعكس حجم الوجود الميكروبي.

لذا، فالكتلة الحيوية معيار بيئي مهم، فهي تقيس كمية الطاقة المختزنة في جزء محدد من المجتمع الحيوي، وتُستخدَم قياسات الكتلة الحيوية لتقدير كمية المحصول القائم من الجماعة، وتحول الطاقة بين المستويات الغذائية Trophic levels في النظام البيئي، ويمكن أن تحول الكتلة الحيوية إلى وحدات وزن (جرام) ومن ثم تحول إلى وحدات طاقة كالوري Calories.

وتشمل القياسات المباشرة للكتلة الحيوية كلًّا من عملية الترشيح والوزن الجاف والطرد المركزي ومن ثم تجميع حجم الخلايا كما هو متبع في المزارع النقية، ولسوء الحظ فإن جميع القياسات المباشرة للكتلة الحيوية المتمثلة في كل هذه الوسائل نادرًا ما تكون ملائمة لتطبيقها على عينات البيئة على مستوى النظام البيئي، وهذه الظروف تُعنى بقياس المعادن وفتات الجزيئات وغير الكتلة الحيوية المرتبطة مع الأحياء الدقيقة، وفشلت في تمييز المستويات الغذائية فيما بين المنتجات والمستهلكات، ومن ثم فإن تقدير الكتلة الحيوية للأحياء الدقيقة في النظام البيئي عادة ما تكون غير دقيقة.

التحاليل الكيموحيوية Biochemical Assays

إن أكثر الجوانب تطبيقًا لتقدير الكتلة الحيوية هو التحليل الكيموحيوي المحدد الذي يوضح وجود الأحياء الدقيقة، ونظريًّا ينبغي أن تكون جميع الأحياء الدقيقة التي سوف تقدر كتلتها الحيوية لها الكمية نفسها، وتُجرى لها التحاليل الكيموحيوية نفسها، وبذلك يكون هناك ارتباط مباشر بين كمية القياسات الكيموحيوية والكتلة الحيوية للأحياء الدقيقة. كذلك، فإن الكيموحيوية التي حللت يجب أن تكون موجودة فقط في الكتلة الحيوية من أجل أن تقدر. وهذان الشرطان نادران، متى ما التقيا فإن النتائج الكمية يجب استكمالها بحذر، حتى يتم تقدير الكتلة الحيوية للأحياء الدقيقة الموجودة في العينات بدقة.

مركب الطاقة ATP

يوجد مخزن أو مستودع الطاقة الكيميائية في خلايا جميع الكائنات الحية، ويعرف باسم أدينوسين ثلاثي الفوسفات Adenosine Triphosphate (ATP)، ويمكن أن يُقاس المركب أدينوسين ثلاثي الفوسفات، ولكن يتطلب ذلك طريقة ذات حساسية عالية، ويعتمد قياسه على المرحلة الفسيولوجية للخلايا، علمًا أن تركيز ATP محدد ومرتبط بكربون الخلية لكثير من الأنواع البكتيرية والطحالب. ونظرًا لسرعة فقد الخلايا الميتة لمركب الطاقة ATP، فإن قياسات تركيز أدينوسين ثلاثي الفوسفات يمكن أن تُستخدَم للدلالة على الخلايا الحية في الوسط الذي تعيش فيه، ولاكتشاف ATP يمكن استخدام تحليل اللوسفيرين الوضاء Luciferin-luciferase assay، وفي هذا التحليل يتفاعل اللوسفيرين المختزل مع الأوكسجين لتكوين لوسفيرين مؤكسد في وجود أنزيم لوسفيريز وأيونات المغنيسيوم ومركب الطاقة ATP، ويطلق الضوء في هذا التفاعل بكمية تتناسب مباشرة مع تركيز ATP، وكذلك يمكن استخدام الكروماتوغرفي السائل عالي الضغط لتقدير كمية ATP، وإن الطريقة المستخدمة لاستخلاص ATP ذات تأثير واضح في حساسية التحليل ومصداقيته، ويجب استخلاص ATP بسرعة وبأسلوب يبقيه على هيئته التركيبية، من أجل أن يتحول بسهولة إلى مركب آخر يسمى AMP، وهناك طرق متنوعة تستخدم لاستخلاص وتقدير مركب الطاقة أدينوسين ثلاثي الفوسفات، وهذه الطرق تشتمل على الاستخلاص بمحاليل عضوية مختلفة أو كوابح Buffers ساخنة، وتعتمد كفاءة خطوات طريقة محددة على طبيعة العينات ومجتمع الأحياء الدقيقة المراد دراسته وتقييمه، ولا يوجد طريقة عامة أو تقنية واحدة تناسب جميع الكائنات الحية الدقيقة وجميع البيئات (Atlas and Bartha 1993).

ويمكن استخدام قياسات ATP المتحصل عليها لتقدير الكتلة الحيوية للأحياء الدقيقة في النظام البيئي، وعادة ما يستخدم عامل تتراوح قيمته بين 250-286 لتحويل قيمة ATP إلى الكربون الخلوي للعينات المائية، وفي حال عينات التربة تكون قيمة العامل 120 لتحويل قراءة ATP إلى قيمة تعبر عن كربون الكتلة الحيوية، وعلى الرغم من ذلك، فهناك بعض الصعوبات في التقديرات الدقيقة للكتلة الحيوية التي تعتمد على نتائج ATP، علمًا أن بعض الأحياء الدقيقة يغير من تركيزات ATP بشكل جذري، وذلك عندما تتغير التغذية أو الحالات الفسيولوجية للكائن الحي، وقد تمتص الجزيئات الدقيقة مركب ATP وذلك في بعض الأنظمة البيئية مثل التربة والرواسب والبيئات المائية في المستنقعات، ما قد يسبب تداخلًا بين امتصاص ATP مع استخلاصه وكميته، فتتأثر بذلك النتائج ومن ثم ترجمتها إلى الكتلة الحيوية، إضافة إلى ذلك، فإن وجود الخلايا النباتية والخلايا الحيوانية التي تحتوي على ATP في العينات تحد من كفاءة تطبيق هذه الطريقة في بعض الأنظمة البيئية (العروسي ووصفي 2001م، الفالح 1428هـ).

وهناك طريقة تعد من أفضل الطرق لتقدير الكتلة الحيوية للأحياء الدقيقة، لكنها في الواقع غير مقبولة بشكل واسع لدى كثير من الباحثين، وتعرف هذه الطريقة باسم مجموعة أدينليت الشاملة

Adenylate Pool Total، وهذه الطريقة تُعدّ غير حساسة للمرحلة الأيضية للخلية، وتقوم على عمليات حسابية وفق معادلتين، ويتم وفق هاتين المعادلتين عمليات حساب وجمع لمركبات الطاقة AMP وADP وATP.

مكونات الجدار الخلوي Cell wall components

يتركب الجدار الخلوي لمعظم الخلايا البكتيرية من حمض الميورامك Muramic acid، وهذه من خصائص البكتيريا التي تميزها عن النبات وبقية الكائنات الحية الدقيقة؛ لذلك يُستخدَم حمض الميورامك في قياس الكتلة الحيوية للبكتيريا تحديدًا دون غيرها من الأحياء الدقيقة، ويقوم تحليل حمض الميورامك على تحرر اللاكتيت Lactate إما بالتحلل الأنزيمي أو التحلل الكيميائي، ومن ثم يقدر تركيز اللاكتيت في العينات، وإن تحويل نتائج حمض الميورامك إلى الكتلة الحيوية يقوم على افتراض أن كل البكتيريا الموجبة لصبغة جرام تملك نسبة 44 ميكروجرام حمض الميورامك في كل ملجرام كربون، والبكتيريا السالبة لصبغة جرام بها 12 ميكروجرام حمض الميورامك في كل ملجرام كربون، وفي الحقيقة هناك درجات متفاوتة من تركيزات حمض الميورامك في البكتيريا الموجبة لصبغة جرام والبكتيريا السالبة لصبغة جرام، ولاستخدام هذه الطريقة بدقة فإنه من الضروري تحديد نسبة البكتيريا الموجبة لصبغة جرام والبكتيريا السالبة لصبغة جرام في العينة، فالتقديرات غير الدقيقة تقود إلى نتائج غير صحيحة في الكتلة الحيوية.

وأما الكتلة الحيوية للفطريات تحديدًا فيمكن الوصول إليها من خلال تقدير كمية الكيتين، وذلك من أجل أن الكيتين تتميز به جدر خلايا الفطريات عن غيرها من الكائنات الحية الأخرى، فمعلوم أن جدر الخلايا النباتية والطحالب غنية بالسليلوز والبكتيريا بحمض الميورامك كما ذُكر سابقًا؛ لذلك تنفرد الفطريات عن النباتات وبقية الأحياء الدقيقة بوجود الكيتين في جدارها الخلوي. وعليه فإنه يتم من خلال تحديد كمية الكيتين معرفة الكتلة الحيوية للفطريات على الرغم من وجود أحياء دقيقة أخرى في العينة أو نباتات أو حتى جذور نباتات في التربة.

الكلوروفيل والصبغات الأخرى Chlorophyll and other Pigments

معلوم أن صبغة الكلوروفيل Chlorophyll وصبغات البناء الضوئي الأخرى Photosynthetic pigments توجد في جميع الكائنات الحية ذاتية التغذية التي تصنع غذاءها بنفسها من خلال عملية البناء الضوئي، وهي النباتات الخضراء والطحالب والبكتيريا وكذلك البكتيريا الزرقاء السيانية Cyanobacter؛ لذا يمكن تقدير الكتلة الحيوية للطحالب والبكتيريا ذاتية التغذية Autotrophic bacteria باستخدام طرق تقيس صبغة الكلوروفيل وصبغات البناء الضوئي الأخرى، وذلك في عدم وجود النباتات في العينة المراد دراستها.

ونظرًا لسيادة صبغة اليخضور أ A Chlorophyll في خلايا الطحالب والبكتيريا الزرقاء السيانية، فإن قياس الكلوروفيل يُعدّ مفيدًا وله أهمية للدلالة على الكتلة الحيوية لهذه الكائنات الحية الدقيقة، على الرغم من عدم وجود علاقة ثابتة بين الكتلة الحيوية وكمية الكلوروفيل. ووجد أن تقديرات الكتلة الحيوية للكائنات الحية الدقيقة ذاتية التغذية تكون ذات علاقة جيدة مع التقديرات التي تعتمد على ATP، ويمكن استخلاص الكلوروفيل أ بمحاليل مثل الأسيتون أو الميثانول وتقدر كميته بالامتصاص باستخدام جهاز الطيف الضوئي Spectrophotometer عند طول موجة 665 نانوميترًا.

إضافة إلى ذلك، فإن الكتلة الحيوية للأحياء الدقيقة يمكن تقديرها أيضًا من خلال قياس تركيزات الحمض النووي DNA وكمية البروتين في خلايا الكائن الحي، وعلى الرغم من دقة هذه المعايير ومصداقية النتائج المتحصل عليها من خلال هذا النوع من التحاليل، لكن يلاحظ أن كثيرًا من الباحثين لا يحبذها (ريفن وآخرون 2002م، عبدالحافظ 1998م)، فهي تصلح على عينات قليلة وفي حدود ضيقة، وغير مناسبة على المدى الواسع بسبب أنها تحتاج إلى جهد كبير واحتياجاتها متنوعة وباهظة الثمن.

الفصل الرابع

النظام البيئي Ecosystem

- النظام البيئي.
- العوامل البيئية.
- تأثير العوامل البيئية في نمو الأحياء الدقيقة.
- الغلاف الجوي.
- البيئة المائية.
- التربة.

الفصل الرابع

النظام البيئي Ecosystem

تضم الأحياء الدقيقة مجموعة هائلة من الكائنات الحية تشمل البكتيريا والبكتيريا الزرقاء والفطريات والطحالب، وهذه الكائنات الحية الدقيقة أوجدها الله عزوجل في هذا الكون الفسيح لتشكل جزءًا مهمًّا وأساسيًّا في البيئة والنظام البيئي ممثلة للمحللات Decomposers، وأودع فيها الخالق سبحانه وتعالى من الخصائص والصفات ما يمكنها من القيام بدورها في النظام البيئي على أكمل وجه وبكل مهارة واقتدار، مثل إفرازها لعدد كبير من الأنزيمات والأحماض العضوية، وسوف أستعرض في الفصول الآتية من هذا الكتاب أبرز الصفات والخصائص لجميع الكائنات الحية الدقيقة، والأهمية الاقتصادية لها في حياة الإنسان، **وسيتم التطرق بشيء من التفصيل إلى البكتيريا؛ لأهميتها الاقتصادية** الكبيرة؛ ولكونها أوسع الكائنات الحية الدقيقة انتشارًا في البيئة؛ وأحد المحللات الرئيسة في النظام البيئي (Chiang et. al. 2008, Gobbetti et. al. 1994, Fletcher & Gray 1987).

يطلق العلماء لفظ البيئة على مجموع الظروف والعوامل الخارجية التي تعيش فيها الكائنات الحية، وتؤثر في العمليات الحيوية التي تقوم بها، ويمكن تعريف علم البيئة بأنه «العلم الذي يهتم بدراسة التفاعلات المتبادلة بين الكائن الحي وعوامل الوسط الذي يعيش فيه». وقد ترجمت كلمة Ecology إلى اللغة العربية بمصطلح (علم البيئة) الذي وضعه العالم الألماني أرنست هيجل Ernest Haeckel عام 1866م بعد دمج كلمتين يونانيتين، هما: Oikes ومعناها مسكن، وLogos ومعناها علم، وعرفه بأنه «العلم الذي يدرس علاقة الكائنات الحية بالوسط الذي تعيش فيه، ويهتم هذا العلم بالكائنات الحية وتغذيتها، وطرق معيشتها ووجودها في مجتمعات أو تجمعات سكنية أو شعوب، ويتضمن أيضًا دراسة العوامل غير الحية، مثل: خصائص المناخ (الحرارة، والرطوبة، والإشعاعات، والغازات، والمياه، والهواء) والخصائص الفيزيائية والكيميائية للأرض والماء والهواء».

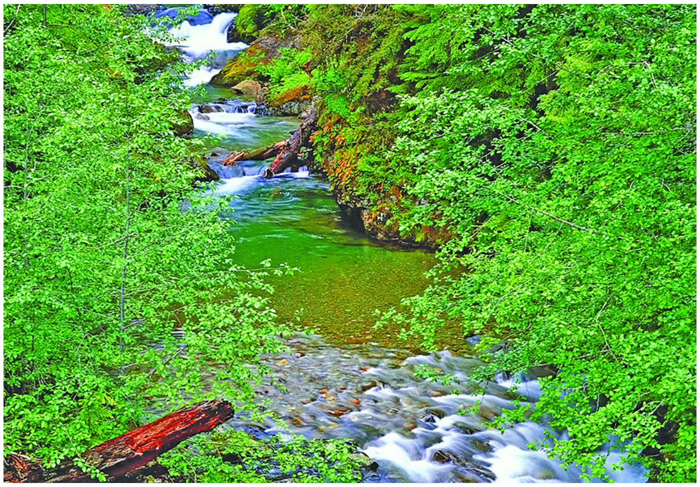
ويتفق العلماء في الوقت الحاضر على أن مفهوم البيئة Concept of Ecology يشمل جميع الظروف والعوامل الخارجية التي تعيش فيها الكائنات الحية، وتؤثر في العمليات التي تقوم بها (Mick Crawley 1996). فالبيئة -بالنسبة إلى الإنسان- هي الإطار الذي يعيش فيه، والذي يحتوي على التربة والماء والهواء، وما يتضمنه كل عنصر من هذه العناصر الثلاثة من مكونات جمادية وكائنات حية، وما يسود هذا النظام من مظاهر شتى من طقس ومناخ ورياح وأمطار وجاذبية ومغناطيسية، ومن علاقات متبادلة بين هذه العناصر، فالحديث عن مفهوم البيئة إذن هو

الحديث عن مكوناتها الطبيعية وعن الظروف والعوامل التي تعيش فيها الكائنات الحية (Márquez et. al. 2007, Ullah et. al. 2014, Werner et. al. 2011).

والبيئة هي كل متكامل يشمل إطارها الكرة الأرضية، أو لِنقُل: كوكب الحياة، وما يؤثر فيها من مكونات الكون الأخرى، ومحتويات هذا الإطار ليست جامدة بل إنها دائمة التفاعل مؤثرة ومتأثرة، ويُعدّ الإنسان من مكونات البيئة، فنجده يتفاعل مع مكوناتها حوله في الوسط الذي يعيش فيه يتأثر بها، ويؤثر فيها، وعلم البيئة ينقسم إلى قسمين أساسيين هما: علم البيئة الذاتية Autecology، وعلم البيئة الاجتماعية Synecology (أبو الفتح 1991م).

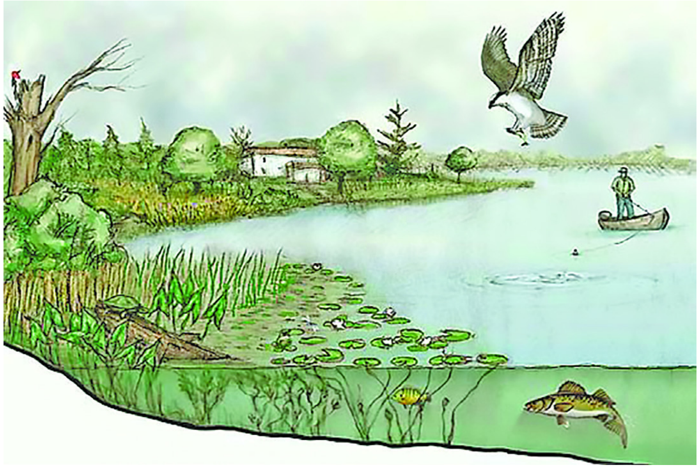
ومفهوم البيئة هو الطبيعة، بما فيها من أحياء وغير أحياء؛ أي العالم من حولنا فوق الأرض، وعلم البيئة هو العلم الذي يحاول الإجابة عن بعض التساؤلات عن كيف تعمل الطبيعة، وكيف تتعامل الكائنات الحية مع المكونات الأخرى أو مع الوسط المحيط بها سواء الكيماوي أو الطبيعي، وهذا الوسط يطلق عليه النظام البيئي Ecosystem.

إن البيئة مكونة من عدد من النظم البيئية التي تشكل في مجموعها البيئة التي تميز هذه المنطقة أو تلك، ويطلق العلماء لفظ النظام البيئي على أي مساحة من الطبيعة، وما يحتوي عليها من كائنات حية، ومواد غير حية، وتفاعلهما مع بعضها، ومن أمثلة النظم البيئية: الغابة، والبحيرة، والبحر، والنهر كما في الشكل (4-1).



الشكل (4-1): نظام بيئي في نهر.

لهذا نجد أن النظام البيئي يتكون من مكونات حية وأخرى ميتة أو جامدة، فعلم البيئة هو دراسة الكائنات الحية وعلاقتها بما حولها من مكونات الأرض، والنظام البيئي هو كل العوامل غير الحية والمجتمعات الحية للأنواع في منطقة ما، والنظام البيئي يقوم تلقائيًّا بعملية التدوير للأشياء التي استعملت ليعيدها لأشياء نافعة مرة أخرى في البيئة المحيطة. الشكل (4-2).



الشكل (2-4): مخطط للنظام البيئي.

وفي النظام البيئي هناك ما يسمى السلاسل الغذائية، ويتم في السلسلة الغذائية انتقال الطعام بين الكائنات الحية من نباتات وحيوانات، وتُعدّ صورة لإظهار تدفق الطاقة الغذائية في البيئة، حيث فيها يتوجه الطعام من كائن حي لآخر ليعطي طاقة للحيوان الذي يهضم الطعام، ومن الجدير بالذكر أن كل سلسلة غذائية تبدأ بالنبات الأخضر الذي يأخذ الطاقة الضوئية من الشمس، ويحولها إلى طاقة كيميائية في صورة مركبات غذائية تختزن في أنسجة جسمه، والحيوانات -بما فيها الإنسان- لا يمكنها صنع غذائها (Cavalier-Smith 1981)، فلهذا لا بد أن تحصل علي طاقاتها من النباتات (المنتجة) أو الحيوانات الأخرى، لهذا تُعدّ الحيوانات مستهلكة، وبعد موت الحيوانات والنباتات يتم تحللهما بواسطة الكائنات الحية الدقيقة (بكتيريا، وفطريات) ليصبحا جزءًا من الأرض بالتربة لتمتصها النباتات مرة أخرى لصنع غذاء جديد، وهذا ما نسميه سلسلة الغذاء.

ومن العوامل الطبيعية في النظام البيئي التي لها تأثيرها، ضوء الشمس، والظل، ومتوسط درجة الحرارة، والتوزيع الجغرافي، والرياح، والارتفاعات، والمنخفضات، وطبيعة التربة، والمياه (الغنيم، وآخرون 1996م). ومن العوامل البيئية المؤثرة في النظام البيئي، مستوي المياه، والهواء في التربة، ومعدل ذوبان المغذيات النباتية في التربة، والمياه، ووجود المواد السامة بهما، وملوحة المياه للبيئة البحرية، والأوكسجين الذائب بها.

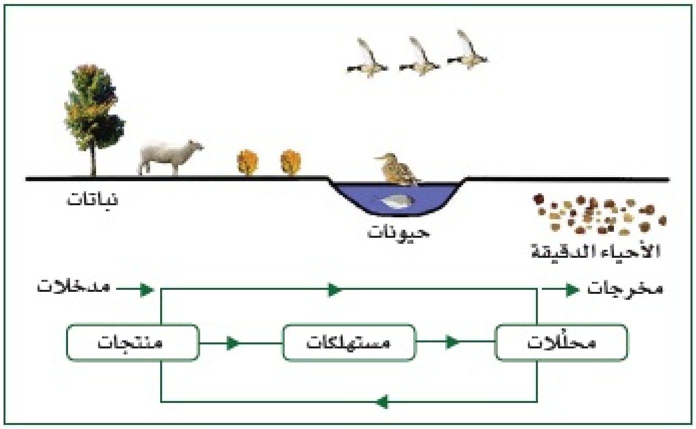
وفي البيئة نجد كائنات حية تصنع المواد، وأخرى تلتهم الغذاء، وثالثة تعيش متطفلة، وتحلل المواد أو تفترس الآخرين، والنظام البيئي يتبع الدورات التدويرية كالدورة الكيماوية الحيوية، حيث تأخذ الكائنات الحية موادها الغذائية لتعيش وتنمو، ثم تعيدها للبيئة بعد موتها وتحللها، ونجد أن الكربون له دورته في البيئة، حيث يتكون ثاني أكسيد الكربون الذي يتصاعد في الجو أو يذوب في الماء، ويُعدّ الكربون المادة البنائية الأساسية للنشويات والدهون والبروتينات والأحماض النووية وغيرها من المواد العضوية الضرورية للحياة، وهناك أيضًا دورة النيتروجين الذي يصنع منه البروتين

والأحماض الأمينية، وإن تثبيت النيتروجين من الجو للتربة يخصب النباتات، وهذا يتم عن طريق بكتيريا التربة أو الماء (Al-Falih 2002). ونجد تدوير الفسفور في ذوبانه في الماء وتكوين العظام وفي الأحياء وقشرة الأرض، ونجد دورة الكبريت الذي يتصاعد من البراكين أو تحلل المواد العضوية في شكل غاز كبريتيد الكبريت أو في شكل كبريتات كما في رذاذ مياه البحر أو من خلال الأنشطة البشرية، ودورة الأوكسجين الذي يتحرر من عملية البناء الضوئي في النباتات، ودورة المياه التي لها أثرها في تحرير العناصر الغذائية في النظام البيئي أو خارجه، وإن التفاعل بين مكونات البيئة عملية مستمرة تؤدي في النهاية إلى احتفاظ البيئة بتوازنها ما لم ينشأ اختلال نتيجة لتغير بعض الظروف الطبيعية كالحرارة، والأمطار أو نتيجة لتغير الظروف الحيوية أو نتيجة لتدخل الإنسان المباشر في تغير ظروف البيئة.

فالتغير في الظروف الطبيعية يؤدي إلى اختفاء بعض الكائنات الحية وظهور كائنات أخرى، ما يؤدي إلى اختلال في التوازن الذي يأخذ مدة زمنية قد تطول أو تقصر حتى يحدث توازن جديد، وأكبر دليل على ذلك هو اختفاء الزواحف الضخمة نتيجة لاختلاف الظروف الطبيعية للبيئة في العصور الوسطى ما أدى إلى انقراضها، فاختلت البيئة، ثم عادت إلى حالة التوازن في إطار الظروف الجديدة بعد ذلك، وكذلك فإن محاولات نقل كائنات حية من مكان إلى آخر والقضاء على بعض الأحياء يؤدي إلى اختلال في التوازن البيئي.

مكونات النظام البيئي:

تقسم مكونات النظام البيئي إلى مجموعتين رئيستين هما: مكونات غير حية (العوامل الطبيعية) وهي مجموعة من العوامل غير الحية التي تؤثر في حياة الكائنات الحية، وتحدد نوعيتها وأماكن وجودها، كما تحدد نوعية العلاقات بين الكائنات الحية، ومكونات حية (العوامل الحيوية) وهي جميع الأحياء في النظام البيئي، ويشمل ذلك أنواعًا من الحيوانات والنباتات والكائنات الحية الدقيقة والإنسان (Chen et. al. 2002, Forbes et. al. 1998, Mossel 1995). ويطلق على مجموعة الكائنات الحية التي تعيش في نظام بيئي، وترتبط فيما بينها بعلاقات متبادلة اسم (المجتمع الحيوي) ففي نظام بيئي - كبحيرة مثلًا - فإن مجموعة الكائنات الحية التي تعيش في البحيرة، وترتبط فيما بينها بعلاقات غذائية تسمى مجتمعًا حيويًّا كما في الشكل (4-3).



الشكل (4-3): مكونات النظام البيئي.

ويمكن تقسيم مكونات النظام البيئي على النحو الآتي:

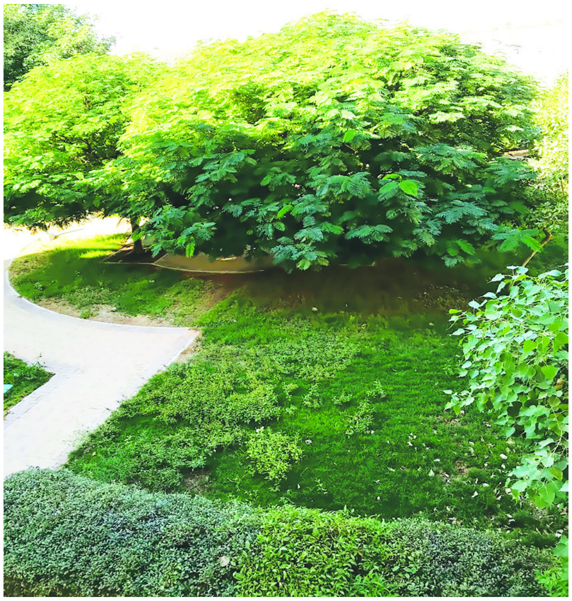
أولًا: مكونات غير حية Abiotic Components.

المكونات غير الحية في النظم البيئية متنوعة، وتتباين في نسبها من نظام بيئي لآخر بحسب طبيعة كل نظام، وتشتمل على ما يأتي:

- **مواد غير عضوية:** مثل المعادن، والماء، وغاز الأوكسجين، وغيره من الغازات الأخرى.
- **مواد عضوية:** مثل البروتينات، والكربوهيدرات، والدهون، والدبال.
- **عوامل بيئية:** وتتضمن الظروف المناخية، مثل: الحرارة، والرطوبة، والمطر، والضوء، والرياح، وغير ذلك من العوامل، إضافة إلى عوامل التربة.

ثانيًا: مكونات حية Biotic Components.

يقصد بالمكونات الحية في النظم البيئية المنتجات Producers والمستهلكات Consumers، فالمنتجات هي كائنات ذاتية التغذية؛ أي إنها تستطيع أن تبني غذاءها بنفسها من مواد غير عضوية بسيطة بواسطة عملية البناء الضوئي، وتتمثل في النباتات الخضراء الشكل (4-4).



الشكل (4-4): المنتجات (النبات الأخضر).

أما المستهلكات Consumers فهي كائنات غير ذاتية التغذية، حيث إنها لا تستطيع أن تُكوِّن غذاءها بنفسها؛ نظرًا لخلوها من صبغ الكلوروفيل، ويمكن تقسيمها إلى قسمين:

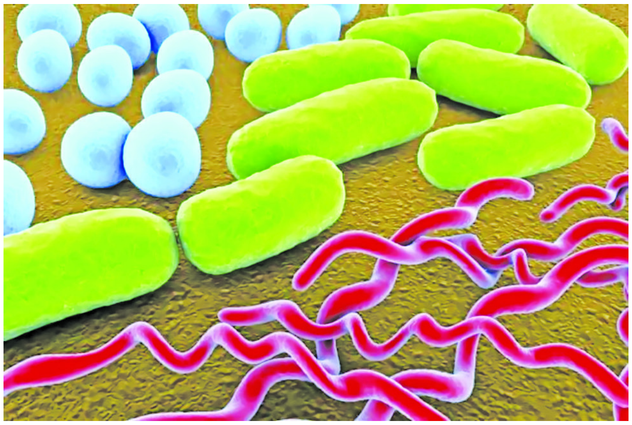
1) مستهلكات كبيرة Macroconsumers

وهي الكائنات الحية التي تتغذى على غيرها من الكائنات، وتضم:

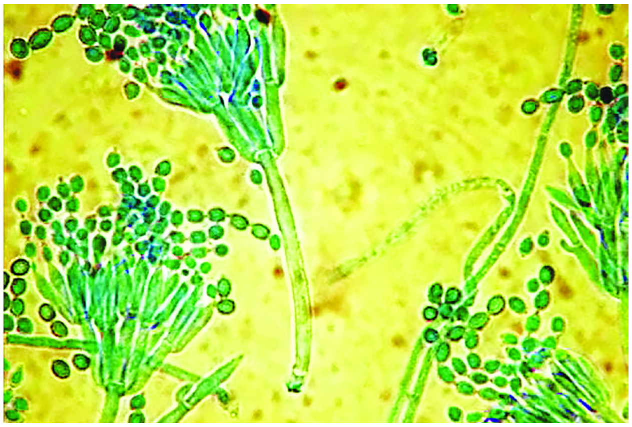
المستهلكات الأولى Primary Consumers التي تسمى آكلات العشب Herbivorous مثل الوضيحي، والأغنام، والإبل، والمستهلكات الثانية Secondary Consumers وهي آكلات اللحوم Carnivores مثل الأسد، والذئب، هذا إضافة إلى آكلات العشب واللحوم Omnivorous مثل الإنسان، وتسمى مستهلكات ثالثة.

3) مستهلكات صغيرة Microconsumers

وتعرف بالكائنات المحللة Decomposers ومن أمثلتها البكتيريا، الشكل (4-5)، والفطريات، الشكل (4-6)، وبعض الكائنات المترممة، وهذه الكائنات تعتمد في غذائها على تفكك المواد العضوية المعقدة في بقايا الكائنات الميتة، وتحولها إلى مركبات بسيطة يسهل امتصاصها من قِبَل النبات مرة ثانية.



الشكل (4-5): أنواع من البكتيريا.



الشكل (4-6): فطر البنسيليوم.

خصائص النظام البيئي

أولًا: تعدد مكوناته

يتكون النظام البيئي من كثير من الكائنات الحية والعوامل غير الحية كما سلف ذكره، وتتفاعل مكونات هذا النظام مع بعضها لتشكل كلًّا متوازنًا ومستقرًّا، حيث تقوم النباتات بتثبيت الطاقة الشمسية وصنع المواد الكربوهيدراتية، فتدخل بذلك الكربون والطاقة في حلقة الحياة، ثم تنتقل الطاقة التي ثبتتها النباتات إلى أجسام الحيوان والإنسان عن طريق أكلها للنباتات أو الحيوانات التي تغذت على النباتات، ثم تقوم الكائنات المحللة بتفكيك بقايا وجثث تلك الكائنات الحية، وتحولها إلى مواد بسيطة تستعملها النباتات في غذائها مرة أخرى (Rose & Harrison (1987-1988,Scherlach & Hertweck 2009).

وللمحللات أهمية خاصة في كل نظام بيئي، إذ إنها تسمح بإعادة استعمال المواد الغذائية بشكل مستمر، وبذلك يتم ضمان استمرار النظام البيئي.

ثانيًا: استعمال الفضلات

من خصائص النظام البيئي أنه يستخدم فضلاته، فإذا أخذنا النظام البيئي البحري مثلًا، فإننا نجد أن الأسماك تخرج فضلات عضوية تقوم البكتيريا بتحويلها إلى مركبات غير عضوية تستعملها الطحالب التي تتغذى عليها الأسماك، وهكذا لا تبقى فضلات في ماء البحر الذي يظل محتفظًا بصفائه.

ونشير في هذا المجال إلى أن قدرة النظام البيئي على التخلص من الفضلات التي ترد عن طريق نشاط الإنسان، قدرة محدودة، وأن تجمع هذه الفضلات دون أن تدخل في حلقة من التفاعلات الحيوية يشكل خطرًا، ونذكر على سبيل المثال تراكم المواد البلاستيكية غير القابلة للتحلل الذي يعطل النظام البيئي، وتراكم مخلفات المصانع في مياه البحيرات الذي يؤدي إلى القضاء على الكائنات الحية.

ثالثًا: التوازن البيئي

تخضع البيئة لقوانين وعلاقات معقدة تؤدي في نهايتها إلى وجود اتزان بين جميع العناصر البيئية، حيث تترابط هذه العناصر ببعضها في تناسق دقيق يتيح لها أداء دورها بشكل وبصورة متكاملة، فالتوازن معناه قدرة البيئة على إعالة الحياة على سطح الأرض دون مشكلات أو أخطار تمس الحياة البشرية، فالمواد التي تتكون منها النباتات، يتم امتصاصها من التربة، ليأكلها الحيوان الذي يعيش عليه الإنسان (Gobbetti & Corsetti 1997). وعندما تموت هذه الكائنات تتحلل، وتعود إلى التربة مرة أخرى، فالعلاقة متكاملة بين جميع العناصر البيئية، فأشعة الشمس والنبات والحيوان والإنسان وبعض مكونات الغلاف الغازي في اتزان مستمر.

ولو تصورنا أن بكتيريا واحدة من بكتيريا الكوليرا تكاثرت بالانقسام لمدة 24 ساعة، وكانت جميع ظروف الحياة ملائمة لبلغ عدد الأفراد ما يقارب من 16 10 14 أو ما يقدر وزنه نصف رطل تقريبًا.

ولو تصورنا أن ذكرًا وأنثى من الضفادع أتيحت لهما ولذريتهما جميع الظروف الملائمة، لنتج عن ذلك بعد خمسة أجيال نحو 2 بليون ضفدعة، غير أن كل هذا لا يتحقق في الحياة؛ لأن الظروف الملائمة لا تتجمع لكائن حي لمدة طويلة، حيث إن هناك عوامل بيئية طبيعية وحيوية تحد من زيادة النسل إلى هذه الدرجة التقديرية، حتى إلى درجة قريبة منها، فقدرة الموارد الطبيعية على إمداد الكائنات الحية بمتطلباتها تصبح في بعض الأحيان محدودة، وكثيرًا ما يحدث أن يصبح الغذاء أو الماء أو الشمس أو العناصر المعدنية محدودة (في حالة النبات) غير متوافرة بصورة مواتية لأي زيادة في أعداد أفراد جماعة معينة من الكائنات، وتجب الإشارة هنا إلى أن التوقف في زيادة عدد أفراد إحدى الجماعات لا يكون مرده التحديد المطلق لمصادر الغذاء فقط، بل يعود أيضًا إلى

التنافس الذي يحصل بينها وبين كائنات حية أخرى على هذه المصادر، والتوازن الذي تحدثه عوامل البيئة يعرف بالتوازن الطبيعي (Scherlach et. al. 2013, West et. al. 2006, Schink 2002).

وتقوم الكائنات آكلة اللحوم والمتطفلات بدور مهم وفعال في حفظ التوازن بين الكائنات الحية، فعندما يزداد عدد جماعة ما من الكائنات، فإن هناك أنواعًا كثيرة من كائنات أخرى تكون على أتم الاستعداد لحصد أفراد هذه الجماعة واستعمالها بوصفها غذاءً لها، ومن ثم تقوم بحفظ التوازن بطريقة بيولوجية، وهذا ما يعرف بالتوازن البيولوجي، ومن المعروف أن عدد أفراد نوع ما من الكائنات الحية يتوقف على معدل سرعة تكاثره ومدى مقاومة البيئة الطبيعية والحيوية لهذا الكائن، وبدهي أن التفاعل بين مكونات البيئة عملية مستمرة تؤدي في نهاية الأمر إلى احتفاظ البيئة بتوازنها ما لم يطرأ أي تغير طبيعي أو حيوي يؤدي إلى الإخلال بهذا التوازن، فإذا ما اختل توازن نظام بيئي ما تطلب الوصول إلى توازن جديد مدة زمنية تطول أو تقصر بحسب الأثر الذي أحدثه الاختلال.

إن أي نظام بيئي على جانب من التعقيد لما يحتويه من كائنات حية متنوعة وعلاقات متبادلة فيما بين الكائنات من جهة وبينها وبين الظروف البيئية من جهة أخرى، ومعنى هذا وجود شبكة من العلاقات هي أساس التنظيم الذاتي المتبادل بين الطبيعة والحياة، وهذا التعقيد هو أحد العوامل الأساسية في سلامة كل نظام بيئي، إذ إنه يحد من أثر التغيرات البيئية، أما إذا تتابعت التغيرات البيئية فإنها تحدث خلخلة في توازن النظام البيئي واستقراره.

إن التفاعل بين مكونات البيئة عملية مستمرة تؤدي في النهاية إلى احتفاظ البيئة بتوازنها ما لم ينشأ اختلال نتيجة لتغير بعض الظروف الطبيعية كالحرارة والأمطار أو نتيجة لتغير الظروف الحيوية أو نتيجة لتدخل الإنسان المباشر في تغير ظروف البيئة، فالتغير في الظروف الطبيعية يؤدي إلى اختفاء بعض الكائنات الحية وظهور كائنات أخرى، ما يؤدي إلى اختلال في التوازن البيئي الذي يأخذ مدة زمنية - قد تطول أو تقصر - حتى يحدث توازن جديد.

العوامل البيئية
Environmental Factors

يتضمن كوكب الأرض عددًا كبيرًا من النظم البيئية التي يمكن تصنيفها إلى نظم بيئية على اليابسة وأخرى مائية، ويتكون كل نظام بيئي رئيس من نظم بيئية فرعية عدة، مثل: الصحاري، والغابات، والمياه العذبة والمالحة، والمستنقعات، علمًا أن لكل نظام بيئي مجموعة من المكونات الحية وغير الحية والموارد الطبيعية الخاصة به، وجميع هذه النظم البيئية تتأثر بالأنشطة البشرية، وتؤثر فيها (Chen et. al. 2015). تكون هذه النظم البيئية مختلفة وواضحة بشكل كبير على اليابسة، ويتحكم في هذا الاختلاف -بشكل كبير جدًا- العوامل البيئية، وتنقسم العوامل البيئية التي تؤثر في نمو

وتوزع وانتشار الكائنات الحية الدقيقة في البيئات الحيوية إلى: عوامل بيئية غير حيوية، وهي العوامل التي تتعلق بالظروف البيئية الخارجية في بيئة الكائن الحي من العوامل الفيزيائية والكيميائية في المناخ والتربة، مثل درجة الحرارة، والضوء، والرطوبة، والتربة، وغيرها. وعوامل بيئية حيوية تدرس العلاقات المتبادلة بين الكائنات الحية، مثل التكافل والتطفل وغيرها (Prescott et. al. 1990, Reed 1982).

ولا تستجيب الكائنات الحية الدقيقة للمؤثرات البيئية المختلفة بطريقة متماثلة، بل على خلاف ذلك تمامًا، فإن بعض المؤثرات البيئية الضارة لبعض الكائنات الحية الدقيقة قد تكون مفيدة لأحياء دقيقة أخرى والعكس صحيح، وإن لكل كائن حي مدى تحمل ضيقًا أو واسعًا للظروف البيئية المختلفة في بيئته التي يعيش فيها، ويختلف هذا المدى بحسب نوع الكائن الحي، فقد يكون مدى تحمله ضيقًا لعامل معين وواسعًا لعامل بيئي آخر، وعادة لا تتوافر الظروف البيئية المثالية لحياة الكائن الحي بسبب تداخل العوامل البيئية بعضها مع بعض (Bold 1989)، والعوامل البيئية المختلفة يرتبط كل منها بالآخر، وتؤثر مجتمعة في انتشار وتوزع الكائنات الحية في النظام البيئي ما يكون سببًا في استقرار النظام البيئي وتوازنه.

وقد قسم العالمان الأمريكيان ويفر وكلمنتس (Weaver & Clements 1938) في عام 1938م العوامل البيئية إلى عوامل مباشرة وعوامل غير مباشرة، وذلك في تأثيرها في نشاط الكائنات الحية، والنوع الثالث تلك التي يظهر أثرها في الكائن الحي من بعيد، ويقسم دوبنمير (Daubenmire 1974) العوامل البيئية إلى أقسامها الثلاثة المعروفة الآتية:

- **العوامل المناخية Climatic Factors**

تضم هذه العوامل سقوط الأمطار Rain fall، ودرجة حرارة الهواء Air temperature، والرطوبة الجوية Humidity، والضوء Light، والرياح Wind، وغيرها من العوامل المناخية التي سيأتي شرحها بالتفصيل.

- **عوامل التربة Soil factors**

تشمل عوامل التربة عددًا من العناصر، مثل: رطوبة التربة Soil Moisture، وقوام التربة Soil Texture، وتفاعل التربة Soil Reaction، وملوحة التربة Soil Salinity، وغيرها.

العوامل الأحيائية Biotic Factors

يقصد بها جميع العوامل المرتبطة بالعلاقات المتبادلة والمباشرة بين الكائنات الحية المتنوعة، مثل: عامل التطفل Parasitism، والتكافل Symbiotic، وغيرها.

تأثير العوامل البيئية في نمو الأحياء الدقيقة

تؤثر العوامل البيئية للوسط الذي تعيش فيه الكائنات الحية الدقيقة في فعالية ونشاط الأنزيمات داخل خلايا الكائنات الحية الدقيقة، على الرغم من أن الكائنات الحية الدقيقة تستطيع تحمل بعض العوامل البيئية غير المناسبة في أثناء نموها، فهناك فرق كبير بين تأثير العوامل البيئية في نشاط وتكاثر الكائنات الحية الدقيقة وبين تأثير العوامل البيئية في حياة تلك الكائنات الحية الدقيقة، واستنادًا إلى ذلك تتأثر معدلات نمو وانقسام الخلايا سلبًا أو إيجابًا بعدد من العوامل البيئية (جبر 2001م)، وفيما يلي شرح موجز لأهم هذه العوامل وكيفية تأثيرها في نمو الكائنات الحية الدقيقة:

1- درجة الحرارة

تُعدّ درجة الحرارة من العوامل المهمة التي تؤثر في نمو وتكاثر الكائنات الحية الدقيقة تأثيرًا مباشرًا، وتُعدّ البكتيريا بسبب كونها بسيطة التركيب وحيدة الخلية أكثر الكائنات الحية الدقيقة حساسية لدرجة حرارة الوسط، وتؤثر الحرارة بشكل فعلي في النشاط الأنزيمي في خلية الكائنات الحية الدقيقة، فمن المعروف أن المعامل الحراري Temperature quotient لمعظم التفاعلات البيوكيميائية يتراوح ما بين (2 - 3) وهذا يعني أن معدل التفاعلات في خلية الكائنات الحية الدقيقة يتضاعف مع ازدياد الحرارة بمعدل عشر درجات، ويقصد بالمعامل الحراري: مقدار الزيادة في سرعة التفاعلات الحيوية مع ازدياد درجة الحرارة بمعدل عشر درجات مئوية في المجال الحيوي (Gunashekaran 2000). ونتيجة لذلك يزداد نشاط ونمو خلايا الكائنات الحية الدقيقة إلى حد يصبح معه الاستمرار في ارتفاع الحرارة مثبطًا أو مميتًا للخلية.

كما هو الحال مع جميع الكائنات الحية يختص كل نوع من أنواع الكائنات الحية الدقيقة بمجال حراري Cardinal temperature ينمو ضمنه بشكل مثالي، ويتحدد هذا المجال بدرجة حرارة دنيا Minimum temperature وهي أقل درجة حرارة يحدث عندها نمو للكائن الحي، ولا يحدث بعدها نمو إذا انخفضت درجة الحرارة عنها، وفي المقابل هناك درجة حرارة قصوى Maximum temperature وهي أعلى درجة حرارة يحدث عندها نمو للكائن الحي، ويتوقف النمو إذا ارتفعت عنها درجة الحرارة، ويتضمن هذا المجال درجة حرارة مثلى Optimum temperature وهي تعبر عن درجة الحرارة التي يصل عندها نمو خلايا الكائنات الحية الدقيقة إلى أقصى معدلاته؛ أي إن درجة الحرارة المثلى هي أفضل درجة حرارة للنمو أو درجة الحرارة التي تنمو عندها الكائنات الحية الدقيقة بأعلى معدل للنمو (Lowery et. al. 2008, Maloy & Powrie 2011, Röling et. al. 1994a).

ومن الجدير بالذكر أن درجات الحرارة الدنيا والقصوى والمثلى تختلف من كائن حي لآخر، فالمدى الذي تنمو فيه الكائنات الحية الدقيقة كبير، فمنها ما ينمو حتى تحت الصفر، وقد تصل إلى درجة حرارة -12، بينما تستطيع بعضها أن تنمو حتى عند درجة حرارة غليان الماء 100، ووُجِد أن بعض الكائنات الحية الدقيقة لها درجات حرارة مثلى تتراوح بين 5 إلى 10، بينما البعض الآخر له

درجات حرارة مثلى تصل إلى 75- 80، وأما الحدود المثلى لمعظم الكائنات الحية الدقيقة فتكون عادة بين 30 - 40.

استنادًا إلى ما تقدم يمكن تقسيم الكائنات الحية الدقيقة بحسب مجال نموها الحراري إلى:

أ - الكائنات الحية الدقيقة المحبة للبرودة Psychrophiles: تفضل هذه الأنواع النمو في درجات حرارة منخفضة بين (0- 15)، وتستطيع هذه الأنواع من الكائنات الحية الدقيقة بفضل احتواء غشائها الخلوي على نسب عالية من الأحماض الدهنية غير المشبعة مقاومة درجات منخفضة من الحرارة تصل أحيانًا إلى بضع درجات تحت الصفر، وتسبب هذه الأنواع فساد الأطعمة التي تُحفَظ عند درجات حرارة منخفضة في الثلاجة.

ب - الكائنات الحية الدقيقة الوسطية Mesophiles: وهي تشمل الغالبية العظمى من أنواع الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في الهواء أو الماء أو التربة، وهذه الأنواع تعيش ضمن مجال حراري يقع بين (20- 45)، وإذا ارتفعت درجة الحرارة عن ذلك تتسبب في موتها، وتنتمي معظم أنواع الطحالب والفطريات والبكتيريا الممرضة Pathogenic bacteria للإنسان إلى هذه المجموعة.

ج - الكائنات الحية الدقيقة المحبة للحرارة المرتفعة Thermophiles: يقع المجال الحراري لهذه الكائنات الحية الدقيقة ما بين (45-65)، وهي تؤدي دورًا مهمًّا في تحلل بقايا المواد النباتية والأسمدة العضوية، وبذلك تفيد في زيادة خصوبة التربة، ولقد وُجِد أن بعض أنواع هذه الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في الينابيع الحارة تستطيع تحمل درجات حرارة عالية قد تصل إلى 80 أو 90.

ومن المعروف أن البروتين، وهو مكون الخلية الميكروبية الأساسي يتعرض للتغير الطبيعي Denaturation إذا ارتفعت درجة حرارته إلى 70 ما يؤدي إلى توقف نشاط وموت خلية الكائن الحي؛ لذا كان تفسير مقاومة الكائنات الحية الدقيقة لدرجات الحرارة المرتفعة محل جدل بين العلماء مدة طويلة، ويُعتقَد الآن أن ذلك يرجع إلى السببين الآتيين:

- احتواء الغشاء الخلوي لبعضها على كميات كبيرة من الأحماض الدهنية المشبعة، وذلك جعل غشاءها الخلوي أكثر ثباتًا في درجات الحرارة العالية.

- انخفاض المحتوى المائي للخلايا ما يُمكنها من مقاومة درجات الحرارة المرتفعة، حيث وُجِد بالتجربة أن بروتينها (ومن ثم أنزيماتها) لا يتعرض للتغيير الطبيعي حتى لو رفعت درجة حرارته إلى120، وإن بعض الأنواع البكتيرية تلجأ إلى التجرثم Sporelation لمقاومة درجات الحرارة العالية.

2. المـاء

يُعدّ الماء عنصرًا أساسيًّا ومهمًّا للحياة بالنسبة إلى جميع الكائنات الحية على سطح الأرض، ومن دونه لن يكون هناك صورة من صور الحياة على وجه الأرض؛ لذلك يقول الخالق E في كتابه الكريم عن أهمية الماء في حياة الكائن الحي: {أَوَلَمْ يَرَ الَّذِينَ كَفَرُوا أَنَّ السَّمَاوَاتِ وَالأَرْضَ كَانَتَا رَتْقًا فَفَتَقْنَاهُمَا وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلاَ يُؤْمِنُونَ} [الأنبياء: 30]. فجميع الكائنات الحية الدقيقة والنباتات والحيوانات والإنسان تعتمد عليه اعتمادًا كبيرًا للاستمرار في الحياة، والماء إما أن يكون على صورة بخار في الهواء أو ماء سائل في الأنهار والبحيرات والبحار والمحيطات أو متجمدًا على هيئة برد أو جليد في القطبين.

ولا تعيش الكائنات الحية الدقيقة من دون الماء؛ لأنه يدخل بنسبة عالية في تركيب خلاياها، ويشكل وسطًا مذيبًا لمكوناتها المتنوعة، ولكن حاجتها للماء تختلف من كائن حي لآخر، وهناك أحياء دقيقة تتميز بسعة انتشارها وتنوعها في المناطق المعتدلة؛ لحاجتها المعتدلة للماء، وتتحمل تغيرات مستويات الرطوبة في أوساطها البيئية التي تعيش فيها.

ومن الجدير بالذكر أن بخار الماء في جميع صوره المتنوعة يُعدّ من أكثر العوامل البيئية التي تؤثر مباشرة في نمو الكائنات الحية الدقيقة وتكاثرها وانتشارها بجميع أنواعها، بل يُعدّ هذا العامل في حقيقة الأمر من أهم وأبرز العوامل البيئية المحددة Limited factor لتوزيع وانتشار جميع الكائنات الحية في البيئات المختلفة على سطح الأرض، وإن تشكل المستعمرات البكتيرية والغزل الفطري والخيوط الطحلبية، وكثافة النمو الميكروبي وتباين الأنواع وانتشارها، مرتبط ارتباطًا وثيقًا بدرجة توافر الماء في البيئة المحيطة ومناسبته للنمو الميكروبي.

وبشكل عام يمكن تقسيم الكائنات الحية الدقيقة من حيث احتياجاتها المائية إلى ثلاثة أقسام رئيسة هي ما يأتي:

- الكائنات الحية الدقيقة المحبة للرطوبة Hygrophytes

إن معظم الأنواع البكتيرية والفطريات والطحالب تقع ضمن هذا القسم، حيث يزدهر نمو الكائنات الحية الدقيقة، وتنتشر في ظل وفرة المياه وزيادة مستوى الرطوبة، وعليه تشكل الأوساط الرطبة بيئات مناسبة لنمو وتكاثر وانتشار الأنواع المختلفة من الكائنات الحية الدقيقة.

- الكائنات الحية الدقيقة الوسطية Mesophytes

يكثر هذا النوع من الكائنات الحية الدقيقة في الترب الرطبة والسطوح المبللة، حيث إن احتياجاتها المائية معتدلة، فتوافر الماء ولو بكميات بسيطة يتيح لها فرصة النمو والانتشار.

- الكائنات الحية الدقيقة الجفافية Xerophytes

يشمل هذا القسم من الكائنات الحية الدقيقة تلك التي تمتاز بخصائص بيئية وقدرات تنافسية عالية تجعلها تقاوم الجفاف وندرة الماء في الأوساط البيئية الجافة، ويكون الضغط الأسموزي داخل خلاياها أكبر بكثير من الوسط الخارجي ما يمكنها من امتصاص الماء المتاح بيسر وسهولة.

ويمكن القول: إن كمية الماء وخصائصه التركيبية، وما يحتوي عليه من أملاح ومعادن تختلف من بيئة لأخرى، ولكن توافر الماء للكائنات الحية الدقيقة لا يعتمد فقط على المحتوى المائي للبيئات المختلفة، بل يخضع أيضًا لعوامل أخرى مختلفة مثل الإدمصاص Adsorption والإذابة، وإلى أي مدى تكون قوة الإدمصاص أو تركيز العناصر الذائبة، وإلى قدرة الكائن الحي على التغلب على هذه العوامل مجتمعة واستخلاص هذا الماء بصورة ميسرة، حتى يتمكن من الاستمرار في مزاولة نشاطاته البيولوجية وبقائه على قيد الحياة في هذه البيئة أو تلك؛ لذا يمكن القول: إن نشاط الماء يكون أكثر ما يمكن في حال عدم وجود مواد مذابة فيه، والعكس نجد أنه يقل نشاط الماء كلما ارتفع تركيز المواد المذابة فيه، ومن أجل هذا نجد أن نشاط الماء في بيئات الأنهار أكبر منه في بيئات البحار، فالبحر الميت مثلًا لا تعيش فيه الكائنات الحية؛ لارتفاع الأملاح فيه ما تسبب في قلة نشاط الماء، فتكون عاجزة عن الامتصاص وتموت، وكذلك الحال بالنسبة إلى العسل والعصائر المركزة ذات التركيز المرتفع من المواد المذابة (Fryxell 1983, Gerez et. al. 2009).

3- الأوكسجين

يُعدّ الأوكسجين من الغازات المهمة لكل صور الحيـاة تقريبًا؛ لأنـه ضروري في عملية التنفس، إلا أن الكائنات الحية الدقيقة تتفاوت في درجة حاجتها لهذا الغاز أو عدم الحاجة إليه إطلاقًا، ويحتوي الهواء الجوي على 20% أكسجين، وعلى ذلك فإن استجابة الأحياء الدقيقة للهواء تختلف اختلافًا كبيرًا من نوع أو جنس لآخر، ويمكن التحكم في نمو كثير من الأحياء الدقيقة بالتحكم في الأوكسجين، وتم توظيف هذه الخاصية في صناعة تعليب الأغذية بواسطة عملية التعقيم التجاري، وبشكل عام تُقسَّم الكائنات الحية الدقيقة على الأقل إلى ثلاث مجموعات تبعًا لاحتياجاتها من الأوكسجين:

- **كائنات حية هوائية إجباريًا Obligate aerobic Microorganisms**: وهي كائنات حية دقيقة تتنفس تنفسًا هوائيًا، ويُعدّ غاز الأوكسجين أساسيًا لحياتها؛ أي لا تستطيع هذه الكائنات الحية الدقيقة النمو إلا مع وجود الأوكسجين، ومن أمثلتها معظم الفطريات والطحالب، ومن البكتيريا النوع Bacillus subtilis.

- **كائنات حية لا هوائية إجباريًا Obligate anaerobic Microorganisms:** وهي أحياء دقيقة تتنفس لا هوائيًا فقط، ولا يمكنها أن تحيا في وجود الأوكسجين، فهي لا تحتاج إلى الأوكسجين مطلقًا في نموها، وإن وجود الأوكسجين في بيئتها يُعدّ سامًا بالنسبة إلى خلاياها، ويتسبب في موتها، ومن أمثلتها من البكتيريا أنواع الجنس Clostridium.

- **كائنات حية اختيارية Facultative aerobic Microorganisms:** وهي الكائنات الحية الدقيقة التي تستطيع النمو، سواءً كان الأوكسجين موجودًا أو غائبًا، ويمثل هذا الطراز أغلبية أنواع البكتيريا، ومنها النوع إنتروكوكس Enterococcus faecalis.

4. الضغط الأسموزي

عند وضع خلايا الكائنات الحية الدقيقة في وسط ذي ضغط أسموزي (تركيز) أعلى من الضغط الأسموزي لسيتوبلازم الخلية الميكروبية، فإن الماء سوف يخرج من داخل خلية الكائن الحي إلى الوسط المحيط، ما يؤدي إلى انكماش الغشاء السيتوبلازمي، وتدخل خلية الكائن الحي في حالة بلزمة Plasmolysis وجفاف تنتهي بالموت؛ نظرًا لخروج ما بها من ماء إلى الوسط الخارجي، ولما كان الضغط الأسموزي العالي مانعًا لنمو أغلب الأنواع البكتيرية والفطريات فقد استخدمت هذه الظاهرة أو الخاصية في أثناء عمليتي التمليح والتسكير لبعض الأغذية؛ بغرض حفظها أطول مدة ممكنة، وتسويقها من دون أن تفسد أو تفقد خواصها الكيميائية أو الفيزيائية بسبب العفن الناجم عن نمو الكائنات الحية الدقيقة ونشاطها.

ولكن هناك أنواع من الكائنات الحية الدقيقة تختلف في درجة تحملها للضغوط الأسموزية العالية، فهناك بعض الأجناس البكتيرية المحبة للملوحة ولديها القدرة على العيش في محاليل مشبعة من الملح، كالجنس هالوباكتيريوم Halobacterium الذي يُفضل النمو في محاليل لا يقل تركيزها عن 15% من ملح كلوريد الصوديوم NaCl، وهذه البكتيريا يكون لونها أحمر نتيجة لوجود صبغة Bacteriorhodopsin ذات اللون القرمزي، التي تستطيع تثبيت الضوء وإنتاج ATP على الرغم من خلو هذه البكتيريا من صبغ الكلوروفيل، وذلك بميكانيكية تختلف عن عملية التمثيل الضوئي، والملاحظ أنها لا تستطيع تحويل غاز ثاني أكسيد الكربون إلى مركبات عضوية كما يحدث في عملية التمثيل الضوئي، فهذه البكتيريا تُعدّ غير ذاتية التغذية كيميائيًّا، وتوجد كائنات حية دقيقة محبة لتركيزات متوسطة من الملح تسمى Moderate halophiles وهي الأحياء التي تتطلب الملح لنموها، ولكنها لا تنمو في المحاليل المشبعة من الملح (Helmholtz-zentrum & Res 2016).

5. الرقم الهيدروجيني (pH)

يعرف الرقم الهيدروجيني بأنه اللوغاريتم السالب لتركيز أيون الهيدروجين في المحلول، ويتراوح بين 1- 14، وكل وحدة تمثل عشرة أضعاف التغير الحاصل في تركيز الهيدروجين، ويُعدّ الرقم الهيدروجيني بمثابة مقياس لدرجة الحموضة والقلوية، فالماء النقي يكون فيه الرقم الهيدروجيني يساوي 7، وكلما قل الـ pH

عن 7 يمثل درجات من الحموضة، بينما أكثر من 7 يمثل درجات من القلوية، ولكل نوع من أنواع الكائنات الحية الدقيقة مدى محدد من الـ pH يستطيع فيه أن يواصل نموه، ويقع الرقم الهيدروجيني

الأمثل لغالبية الكائنات الحية الدقيقة في المجال ما بين (pH: 5 - 9) وهذا المدى يمثل معظم البيئات الطبيعية، إلا أن بعضها مثل معظم الفطريات يفضل الأوساط الحامضية (pH 6)، وبعضها الآخر يعيش في الأوساط القلوية (pH 8). ومن الجدير بالذكر أن هناك أحياء دقيقة مثل بعض الخمائر والفطريات تنمو عند درجات متعادلة، لكنها في الوقت نفسه تستطيع تحمل درجات منخفضة من الحموضة، وتسمى Facultative acidophiles. أما الأحياء الدقيقة التي يتطلب نموها توافر أوساط حامضية، فتسمى محبة للحموضة إجبارية Obligate acidophiles مثل بعض الأنواع البكتيرية المؤكسدة للكبريت Thiobacillus.

6. الإشعاعات

تتطلب بعض الكائنات الحية الدقيقة وجود الضوء المرئي لكي تنمو وتتكاثر مستعملة الطاقة الضوئية التي تصدر من ضوء الشمس، وتقوم بتحويلها إلى طاقة كيميائية بواسطة ما يعرف بعملية التمثيل الضوئي Photosynthesis. وهذه الكائنات الحية الدقيقة القادرة على القيام بعملية التمثيل الضوئي، وهي البكتيريا والبكتيريا الخضراء مزرقة والطحالب تحتوي على صبغات مختلفة أهمها الصبغات الخضراء التي تشبه الكلوروفيل النباتي، وتحمل الإشعاعات القصيرة Short wave radiations التي يقل طول موجتها عن 300 نانوميتر طاقة عالية، ويزداد المحتوى الطاقي لهذه الإشعاعات كلما كانت أمواجها أقصر، وتُعدّ الإشعاعات قصيرة الأمواج ضارة لجميع الخلايا الحية، ويزداد ضررها بالنسبة إلى الخلايا البكتيرية التي تُعدّ بسيطة وعارية، حيث تعمل الطاقة العالية لهذه الأمواج على تأين الخلية Ionizing وموتها، أو إحداث تغيرات في مادتها الوراثية (طفرات). وتُعدّ الأشعة فوق البنفسجية Ultra violet (UV) من أهم الإشعاعات القصيرة القاتلة للبكتيريا؛ ولذا تستخدم هذه الإشعاعات في تعقيم الأدوات والمختبرات وغرف العمليات للحد من التلوث الميكروبي.

7- المواد السامة

هناك عدد من المواد السامة materials Toxic بالنسبة إلى الكائنات الحية الدقيقة، ويطلق عليها أيضًا اسم المطهرات Disinfectants، وقد تتسبب هذه المواد في موت الكائنات الحية الدقيقة، أو أنها تثبط نموها دون أن تقتلها، وتعود الأحياء الدقيقة إلى النمو بعد إزالة آثار المادة السامة، وتتعدد هذه المواد بالنسبة إلى الخلايا الميكروبية، وتتنوع طريقة تأثيرها، فمنها على سبيل المثال الهالوجينات (كالكلور، واليود) التي تعمل على أكسدة وتخريب المواد العضوية البنيوية في الخلية البكتيرية، ومركبات السلفا التي تتداخل مع الأنزيمات الخاصة بعملية التنفس ونقل الطاقة بالخلية (Cugini et. al. 2007, Deibel & Schoeni 2003). إضافة إلى الكحولات والمعادن الثقيلة والمعقمات الغازية التي تعمل على تغيير طبيعة الأنزيمات والبروتينات والأحماض النووية بالخلية، وإن هناك الصابون والمنظفات الصناعية التي تعمل على اختزال التوتر على سطح الخلايا

الميكروبية، ومن ثم تثبط النمو دون أن تقتل الكائن الحي. ومن الجدير بالذكر أن استخدام المواد الكيميائية لعلاج عدد من الأمراض التي تسببها بعض الكائنات الحية الدقيقة الممرضة يُعدّ من أهم الاكتشافات في مجال الطب، ففي عام 1900م اكتشف العالم الألماني إيرلخ Paul Ehrlich ما أسماه بالسمية الاختيارية Selective toxicity لبعض المواد الكيميائية التي تصيب الأحياء الدقيقة المرضية، ولا تؤثر في خلايا الشخص المريض مثل مادة السالفرسان Salvarsan التي استخدمت لعلاج مرض الزهري Syphilis.

الغلاف الجوي Atmosphere

يؤدي الغلاف الجوي دورًا مهمًّا من الوجهة البيئية في انتشار وتوزيع الكائنات الحية الدقيقة في الطبيعة، فجميع الكائنات الحية الدقيقة من بكتيريا وطحالب وفطريات لها حدود في تأثير وتحمل Tolerance العوامل الجوية المختلفة إذا تَعدّتها لا تنمو الكائنات الحية الدقيقة طبيعيًّا، ولا يمكن لكائن حي أن يحقق نموًّا وانتشارًا في منطقة ما من مناطق العالم إلا إذا تأقلم تمامًا مع الظروف الجوية المساعدة في تلك البيئة، وتحدد العوامل الجوية أو المناخية تشكل الفلورا الميكروبية Flora Microbial وتكوين التربة في كل منطقة، وتُعدّ درجة الحرارة والأمطار من أهم العوامل المحددة للتربة، وإضافة إلى ذلك فإن العوامل الجوية تُعدّ من أهم العوامل المؤثرة في عوامل التعرية في التربة؛ خاصة في المناطق الجافة (Eddy Van Der Maarel 2004). ويشتمل الغلاف الجوي على درجة الحرارة، والضوء، والترسيب Precipitation، والرطوبة الجوية Atmospheric Humidity، وحركة الهواء والبحر.

ويتباين المطر -بدرجة كبيرة- من حيث كميته وتوزيعه في المناطق الجغرافية المختلفة، إذ يتراوح بين مطر مستمر كما في الغابات المطيرة، حيث تصل كميته في السنة نحو 25 مترًا؛ أي ما يعادل 25.000 ملليتر وبين مطر يقرب من حد الانعدام في بعض المناطق الصحراوية شديدة الجفاف، ويختلف كذلك الترسيب من حيث تركيبه بين الجليد، والمطر، والضباب، والندى.

وتُعدّ الأمطار من أكثر أشكال الماء تأثيرًا في الكائنات الحية الدقيقة في البيئات الطبيعية، وعلى الرغم من ذلك هناك أهمية كبيرة وواضحة لأشكال الماء الأخرى في حياة ونمو الكائنات الحية الدقيقة، ويتوافر الماء في البيئة على ثلاث صور أساسية، هي:

1. الرطوبة، وتمثل بخار الماء غير المرئي.

2. السحب والضباب، وتمثل بخار الماء المرئي.

3. الماء المترسب، إما على شكل قطرات ماء سائل كالأمطار أو في شكل صلب، مثل البرد، والثلج.

وقد تتبيَّن فاعلية الترسيب Efficiency of Precipitation في أي منطقة بيئية من خلال تأثيرها في رطوبة التربة، حيث تُعدّ التربة هي المستقبل الرئيس أو السطح الأكبر الذي تتجمع عليه كميات الترسيب في شتى صورها؛ لذا فإن رطوبة التربة تعكس الكمية أو المقدار الحقيقي الناتج عن عملية الترسيب، وهناك بعض المعادلات التي يمكن استعمالها في تقدير فاعلية المطر، ومن أمثلتها المعادلتان الآتيتان:

$$\text{كمية المطر الفعالة} = \frac{\text{كمية المطر (سم)}}{\text{متوسط درجة الحرارة (م}^{\circ}\text{)} + 10}$$

ويمكن تقدير فاعلية المطر أيضًا باستعمال المعادلة الآتـية:

$$\text{فاعلية المطـر} = \frac{\text{كمية المطـر (سم)}}{\text{النقص في الضغط البخاري عن درجة التشبع (مم زئبق)}}$$

وهنـاك طرق عدة ومتنوعة لتقدير فاعلية الأمطار أو درجة الجفاف Degree of Aridity في الغلاف الجوي، وبعضها تعتمد في تقدير فاعلية الأمطار على إدخال عوامل مناخية متعددة، مثل: سرعة الرياح، والرطوبة النسبية، وعدد الساعات التي تشرق فيها الشمس، إضافة إلى درجة الحرارة، وهذه طرق حديثة ودقيقة لكنها معقدة، ومن المعادلات التي تُتبَع في تقدير فاعلية الأمطار المعادلة الحرارية التي اقترحها Emberger الآتية (Peter 1999):

$$Q = \frac{P \times 100}{(M+M)\,(M-m)}$$

حيث:

Q= درجة الجفاف أو فاعلية الأمطار.

P= كمية الترسيب في السنة (سم).

M= متوسط النهاية العظمى لدرجة الحرارة في الشهور الأشد حرارة.

m= متوسط النهاية الصغرى لدرجة الحرارة في الشهور الأقل

حرارة.

وكلما زادت قيمة Q، دل ذلك على ارتفاع فاعلية الأمطار أو النقص في درجة الجفاف.

الرطوبة الجوية Atmospheric Humidity

تُعدّ الرطوبة الجوية أحد العوامل المهمة التي تؤثر مباشرة في تبخر الماء من سطح النبات بالنتح ومن سطح التربة، وقدرة الهواء على التبخير تتأثر برطوبة الهواء ودرجة الحرارة وحركة الهواء، وهناك طرق عدة للتعبير عن كمية بخار الماء الموجودة في الهواء، منها: طريقة الرطوبة النسبية، وهي تعبر عن النسبة المئوية بين كمية بخار الماء الموجودة في الهواء وكمية بخار الماء اللازمة لتشبع الهواء تحت درجة الحرارة نفسها، والطريقة الأخرى تعتمد على تقدير الضغط البخاري في الهواء، وهناك علاقة مباشرة بين الضغط البخاري للهواء ومعدل التبخر من سطح النبات أو سطح التربة، فكلما زاد الفرق بين الضغط البخاري للهواء والضغط البخاري من سطح التبخر، زاد معدل التبخر، ويُعدّ الضغط البخاري عند سطح التبخر هو الضغط البخاري للهواء المشبع بالرطوبة عند درجة حرارة الهواء.

ويمكن تقدير الضغط البخاري للهواء بالمعادلة الآتـية:

الضغط البخاري = الرطوبة النسبية للهواء الضغط البخاري للهواء المشبع بالبخار عند درجة الحرارة نفسها

إن بخار الماء في جميع صوره المتنوعة من أكثر العوامل البيئية التي تؤثر مباشرة في توزيع وانتشار الكائنات الحية الدقيقة، بل يُعدّ هذا العامل من أهم وأبرز العوامل المحددة لتوزع وانتشار جميع الكائنات الحية في البيئات المختلفة على سطح الأرض، وإن تشكل المستعمرات البكتيرية والغزل الفطري والخيوط الطحلبية، وكثافة النمو الميكروبي وتباين وانتشار الأنواع، مرتبط ارتباطًا وثيقًا بدرجة توافر الماء في البيئة المحيطة، وتزداد رطوبة التربة في أي بيئة من البيئات الطبيعية مع زيادة الرطوبة الجوية؛ لذا تُعدّ الرطوبة الجوية مصدرًا مهمًّا لرطوبة التربة، حيث يلاحظ أن المناطق التي يكثر فيها الضباب والندى، تتكاثف قطرات الماء الدقيقة على سطح التربة وتغمرها بالماء، فيزيد من رطوبة التربة، ويحدث ذلك أيضًا في المناطق المرتفعة حين يلامس السحاب سطح الأرض، ومن أشهر الأمثلة على الكائنات الحية الدقيقة التي تمتص بخار الماء من الجو مباشرة تلك المحبة للرطوبة Hygrophytes التي لا تتحمل الجفاف، وتعيش في البيئات ذات الرطوبة العالية (الفالح وعياش 1424هـ). ومنها الطحالب التي تكثر في الغابات الاستوائية المطيرة، والأشنات المعلقة التي تنمو على أشجار العرعر في المرتفعات الجنوبية الغربية من المملكة، مثل: أبها،

والباحة (الشكل 4-7)، حيث تستطيع الكائنات الحية الدقيقة المحبة للرطوبة أن تمتص بخار الماء من الهواء مباشرة دون أن يتكاثف، خصوصًا عندما تصل الرطوبة النسبية إلى 85%.

الشكل (4-7): أشنة ورقية نامية على جذع شجرة.

البيئة المائية Aquatic environment

تُوجَد الكائنات الحية الدقيقة في البيئة المائية عند درجات حرارة واسعة المدى، وتكون جزءًا كبيرًا من الكساء الخضري للبحار والمحيطات والبحيرات وغيرهما من المسطحات المائية، والكائنات الحية الدقيقة شائعة الوجود في المياه الراكدة، وبعضها خصوصًا الطحالب تعيش حرة على سطح الماء مكونة طبقة سطحية من العوالق النباتية Phytoplankton، بينما البعض الآخر يكون ملتصقًا بالحجارة المغمورة أو ملتصقًا بالنباتات المائية، وتُعدّ البيئة المائية من أهم البيئات الطبيعية التي تُوجَد فيها الكائنات الحية الدقيقة، وتستمد أهميتها من أهمية الماء في حياة الكائنات الحية (Gibson et. al. 2009)، فالماء هو أساس الحياة داخل خلايا الكائنات الحية وفي الوسط الذي تعيش فيه؛ لذا تصل نسبته إلى 97% في خلايا الكائنات الحية، وتنقسم البيئة المائية إلى ثلاثة أقسام رئيسة هي: المياه العذبة، والمياه المالحة، والمياه قليلة الملوحة، ولكل بيئة ما يناسبها من كائنات حية دقيقة تتأقلم مع ظروفها البيئية، وتتكيف مع خصائصها بما يكفل معيشتها وتكاثرها في هذه البيئة أو تلك وفق قدرات تنافسية ينفرد بها كل نوع من الكائنات الحية الدقيقة المختلفة فيما بينها (Pettit 2009, Margulis et. al. 1990, West & Buckling 2003, Röling et. al. 1994b).

1. المياه العذبة Fresh Water

تُوجَد المياه العذبة في الأنهار والجداول والبحيرات والبرك والمستنقعات، وتجدر الإشارة هنا إلى أن المياه العذبة لا تزيد نسبتها على سطح الأرض على 3% فقط من مجمل كمية الماء الموجودة، وأن 98% من هذه المياه العذبة موجودة على صورة جليد في القطبين، وتمتاز المياه العذبة بقلة الأملاح فيها، ودرجة الحموضة pH؛ أي إن تركيز أيون الهيدروجين فيها يكون أقرب للمتعادل، ما

يوفر بيئة مناسبة لعدد كبير من الكائنات الحية الدقيقة غير المحبة للملوحة Non Halophytic microorganisms. وتنقسم بيئة المياه العذبة إلى قسمين رئيسين، وهما بيئة المياه الجارية، وبيئة المياه الساكنة:

- **المياه الجارية (المتحركة)** وتضم مياه الأنهار والجداول، وعادة يكون منبع النهر في منطقة مرتفعة، ويبدأ بالانحدار تدريجيًّا؛ فلذلك تكون سرعة المياه عالية في مقدمة النهر، وتبدأ بالانخفاض كلما قل ارتفاع السهول، ويبدأ حجم الماء المتدفق يزداد وينتشر حتى يصبح المجرى راكدًا أو شبه راكد، عند الانتقال من مياه سريعة إلى بطيئة تزداد درجة الحرارة وكمية الأوكسجين تقل، وإضافة إلى ذلك يصبح قاع النهر رمليًّا أو طينيًّا بعدما كان صخريًّا مزحلقًا.

- **المياه الراكدة،** وتشمل البحيرات والبرك والمستنقعات، وإن بيئة المياه الراكدة يمكن تقسيمها إلى ثلاثة أقسام: أولها خط الشاطئ، ويقع هذا النطاق على حافة البحيرة أو البرك المائية، ويمتد من خط الشاطئ إلى مكان انتهاء المجتمعات النباتية التي لها جذور في القاع، وتحتوي هذه المنطقة على البكتيريا وبعض الفطريات والطحالب.

ثم يأتي القسم الثاني من المياه الراكدة، ويسمى الماء المفتوح المضيء، وهو النطاق في عرض البحيرة الذي يخترقه الضوء، وهو يحتوي على كائنات منتجة مثل الدياتومات، والطحالب الخضراء، والبكتيريا الزرقاء مكونة العوالق النباتية Phytoplankton. وأما القسم الثالث والأخير من المياه الراكدة فهو الماء المفتوح المظلم، ويقع تحت النطاق المضيء، وهذا الجزء ممكن أن يكون صغيرًا في البرك، ولكنه يشكل جزءًا كبيرًا في البحيرات الكبيرة والعميقة، وهذا النطاق يُعدّ ممرًّا للفتاتات من النطاق الأعلى، ويحتوي على مجتمعات المحللات على قاعه الطيني، وتوجد أنواع هائلة من البكتيريا المترممة والفطريات في هذا النطاق.

2 . مياه قليلة الملوحة Brackish Water

تكون المياه قليلة الملوحة وسطًا في خصائصها الفيزيائية والكيميائية بين المياه العذبة ومياه البحر الغنية بالأملاح، وهذا - بلا شك - ينعكس على صفاتها البيولوجية وعلى ما يعمرها من كائنات حية دقيقة أو حتى راقية، وتشتمل هذه المياه على أنواع مختلفة من المستنقعات المائية تشمل المستنقعات الساحلية، ومن أهمها مصب النهر بالبحر، حيث يلتقي الماء العذب بالمالح، وتوجد كائنات حية دقيقة تكيفت لهذه البيئة المتذبذبة، وتضم كذلك بعض المستنقعات المتأثرة بالمد والجزر، وكذلك مستنقعات المانجروف Mangroves التي تكثر في المناطق الاستوائية، وإضافة إلى ذلك هناك المستنقعات القارية، وهذه من أهمها البوك Bog الذي ينتشر في المناطق الرطبة ومناطق الغابات الباردة في أمريكا الشمالية وأوروبا، وتكون المياه مغلقة الجوانب، وتصعب حركة المياه الجوفية منها وإليها. وكذلك يوجد غطاء نباتي متماسك، ويتميز لون الماء باللون الأحمر الفاتح نتيجة لإفراز المواد العضوية من الكائنات الحية الدقيقة والنباتات المتفسخة، وتوجد كمية قليلة من النيتروجين، وتكثر

في المستنقعات القارية أنواع من البكتيريا التي تكون كبريتيد الهيدروجين، وتوجد في هذه البيئة بعض الطحالب والحشائش والنباتات آكلة الحشرات.

وتضم المستنقعات القارية كذلك مستنقعات الغابات التي تشبه البرك المائية، غير أنها تحتوي على أشجار، وتوجد كائنات حية دقيقة مختلفة في هذه البيئة، إضافة إلى ذلك توجد المستنقعات الملحية التي تكثر في المناطق الصحراوية، وخصوصًا في الأجزاء المنخفضة كما هو الحال في المستنقعات الملحية والسبخات Marshes في المناطق الجافة من المملكة العربية السعودية.

3 . المياه البحرية Marine Water

تغطي المحيطات 361 مليون كم2؛ أي نحو 71% من سطح الكرة الأرضية، ويبلغ معدل عمق المحيطات 3750م، وأعمق نقطة هي خندق ماريانا ترنش Mariana Trench في المحيط الهادي، حيث يبلغ عمقه 10750م، ونسبة الملوحة تعادل نحو 3% ولكن تتغير بالعمق والموقع الجغرافي، فمثلًا معدل التبخر يكون عاليًا حول خط الاستواء مسببًا ارتفاعًا في معدل الملوحة عنه في المناطق المعتدلة، ونحو 90% من صنع الغذاء وتكوين الأوكسجين يحدث في المياه؛ لذلك معظم الحياة على الأرض تعيش في الماء، والاختلاف في درجة الحرارة في البحار يكون قليلًا مقارنة باليابسة؛ لذلك بيئات البخار تكون أكثر ثباتًا، ودرجة حرارة الأعماق هي نحو 3 درجات مئوية، ومن مميزات المحيطات وجود الأمواج بسبب وجود اختلافات في درجة الحرارة من مكان لآخر، وبسبب وجود حركة الرياح فوق البحار (Pettipher & Rodrigues 1982, Ronney et. al. 2004).

وعلى طول خط الاستواء يوجد ارتفاع في درجة حرارة الماء الذي يسبب حركته في اتجاه القطبين، وتسبب الرياح ودوران الأرض اختلالًا لهذه الحركة مكونة خلايا مائية دوامة، وتلك تكون في اتجاه عقرب الساعة شمال خط الاستواء، وأما في الجنوب فالحركة تكون عكس عقارب الساعة، ويحدث خلط لمياه البحر في المناطق الساحلية الضحلة وفي الطبقات العليا المضيئة في الماء المفتوح في عرض البحر (المنطقة السابحة). وإنه نتيجة للخلط القليل بين مياه المناطق العميقة والسطحية المضيئة تكون كمية المغذيات العضوية ضعيفة.

وتزخر مياه البحار والبحيرات بكثير من الأحياء الدقيقة المائية، وهي تُعدّ مصدرًا متجددًا لكثير من المواد الغذائية والعناصر الكيميائية المهمة ومواد متنوعة الاستخدام كاللؤلؤ والمرجان والإسفنج والصدف إلى جانب دورة الماء العذب بين الأرض والجو والكائنات الحية، وتحفظ البحار الحرارة على الأرض، وتشعها على اليابسة بفضل احتفاظ الماء بالحرارة وفقدها ببطء، ما يتيح ظروفًا مناسبة للحياة في مياهها وعلى أعماق مختلفة، وتعمل البحار على تلقي كل ما يسيل على اليابسة من مركبات وملوثات وترشحها ليعود استخدامها في دورات جديدة بين الأحياء المختلفة، وتمد البحار جو الأرض بكمية كبيرة من الأوكسجين خلال عملية البناء الضوئي للطحالب البحرية المنتشرة على

مياهها السطحية وللبحار دور كبير في الملاحة والسفر والتجارة الدولية، وتوفر شواطئها أماكن جيدة للترفيه والرياضة المائية.

وتبدأ الأحياء البحرية بسلسلة المنتجين، وهي الطحالب البحرية والهائمات المجهرية النباتية التي تشكل قاعدة هرم الغذاء في البحر، ويليها عدة سلاسل غذائية من المستهلكين، وتتوافر في البحر سلسلة من الأحياء الدقيقة المحللة Decomposers على شكل بكتيريا وفطريات تقوم بتحليل أجسام الأحياء الميتة أو الفضلات العضوية إلى عناصر غير عضوية تتاح من جديد للاستخدام في بناء أجسام الأشكال المنتجة بفضل طاقة الشمس وثاني أكسيد الكربون والماء، وتشكل المياه البحرية بيئة خصبة للأحياء المختلفة، فهي تتفاوت في العمق من عشرات الأمتار في بعض البحار والخلجان الضحلة إلى أكثر من عشرة آلاف متر في بعض المحيطات، ومتوسط عمق البحار 3800م، وهي مأهولة بالأحياء بدرجات متفاوتة، فتتوافر في الطبقات العليا، وتقل مع زيادة العمق لظروفها الشديدة: البرودة، والظلام، وزيادة الضغط، وندرة الغذاء.

وتشكل الطحالب جزءًا كبيرًا من مصادر الأحياء المائية ولها ألوان وأحجام مختلفة، فمنها الأزرق والأحمر والبني والأخضر والذهبي بسبب اختلاف أصباغها وتنوعها في العمق (لاصطياد) موجات أشعة الشمس المختلفة واستخدامها في البناء الضوئي، وأكثر المياه البحرية إنتاجًا هي المياه الساحلية الغنية بالمصبات والتيارات، وهي تغطي 49% أيضًا، والكمية القليلة الباقية 2% يتم اصطيادها من مياه البحر المفتوح الذي يشكل نحو 90% من مساحة سطح البحر، فهو فقير في الإنتاج؛ لبعده عن الشواطئ ونقص العناصر التي تنزل إلى البحر من اليابسة، ويمكن تقسيم بيئة المياه البحرية إلى المناطق الآتية:

أ ـ منطقة الشاطئ.

يقصد بها منطقة المد والجزر، حيث يتقابل البحر باليابس، وهذه المنطقة وما فيها من كائنات حية دقيقة أو راقية معرضة للأمواج العنيفة وكذلك للعوامل البيئية الأخرى كالشمس والرياح والأمطار وللتغير الكبير في درجة الحرارة، وإضافة إلى ذلك تكون معرضة لعوامل التعرية والترسيب، ولقد تكيفت الكائنات الحية في هذه المنطقة إلى تلك التغيرات والظروف، فعلى السواحل الصخرية تتميز الكائنات الحية باحتوائها على أعضاء ماسكة تمكنها من مقاومة الأمواج وفي المناطق الرملية تتميز بأعضاء تثبيت كالحراشف تمكنها من العيش على الرمال، وتقسم هذه السواحل إلى نوعين رئيسين هما: السواحل الرملية، والسواحل الصخرية، ويحتوي كل نوع على أنواع من الكائنات الحية الدقيقة، وتحتوي الشواطئ الصخرية عادة على عدد أكبر من الكائنات الحية.

ب ـ منطقة الرف القاري.

تمثل منطقة الرف القاري الامتداد الخارجي لليابسة تحت الماء قبل الانحدار الفعلي الحاد إلى المناطق العميقة في البحار، وتمتد هذه المنطقة من المنطقة الساحلية متدرجة إلى أن يكون عمق الماء نحو 200م، وهذه المنطقة غنية بالأملاح المعدنية القادمة من الأنهار ومن التيارات الصاعدة من حافة الرف القاري؛ فلذلك نمو الأحياء الدقيقة والنباتات يكون فيها وفيرًا، ومن ثم فإنه يدعم أحياء متنوعة؛ لذلك تشتمل هذه المنطقة على معظم مصايد أسماك العالم، وإن 80% من الأسماك البحرية تؤخذ أو تصطاد عادة من عمق لا يزيد على 200م.

جـ - منطقة التيارات الصاعدة.

إن منطقة التيارات الصاعدة هي منطقة منحدرة صغيرة تقع عند حافة الرف القاري، حيث تتعرض للتيارات الصاعدة من قاع المحيط مسببة دفع المياه من الأعماق إلى حزام المنطقة المضيئة، وتعيش بعض الطحالب المائية في هذه المنطقة، على الرغم من أنها غير مستوية بل متدرجة في الانحدار، ويبدأ منها صعود التيارات المائية إلى الأعلى ما يسبب عدم استقرار الكائنات الحية الدقيقة فيها.

د - المنطقة السابحة.

المنطقة السابحة هي المنطقة الواسعة في عرض البحر، حيث تشكل نحو 90% من مساحة المحيط، ومعظم أجزاء هذه المنطقة تقع تحت المنطقة المضيئة، وهذه المنطقة فقيرة نسبيًّا من الناحية البيولوجية؛ وذلك لأن الكائنات الحية تموت، ثم تترسب خارج نطاق المنطقة المضيئة، ون الناك بيئةتضم الكائنات الحية الدقيقة في هذه المنطقة الأحياء الطافية Phytoplankton. وتقسم هذه المنطقة عموديًّا إلى أربع مناطق: أولها العلوية، وهي المنطقة المضيئة التي ربما تصل إلى عمق 100م، وتقوم عملية التمثيل الضوئي بتدعيم الحياة في هذه المنطقة، وتوجد في هذه المنطقة الدياتومات والطحالب التي تُعدّ هي الكائنات الحية الدقيقة الرئيسة، ثم الوسطى، وتوجد أسفل المنطقة المضيئة مباشرة، وهناك السفلية، وهي أسفل السابحة الوسطى، وكلتا المنطقتين تعتمدان على الغذاء من المناطق الأخرى، وبالأخص المنطقة العلوية المضيئة (Loss & Hotchkiss 2001, Margulis 1971, Margulis 1974). أما المنطقة الرابعة فتسمى البيئة القاعية، وهذه تتميز بالضغط الهائل والظلام الدائم ودرجة الحرارة الثابتة القريبة من الصفر؛ نظرًا لوجود حاجز حراري ثابت، وتتميز بالضغط الهائل بسبب وجود المياه من فوقها، فالضغط يعادل 1050 ضغطًا جويًّا في منطقة الترنش الفلبيني الكائن على عمق 10500م. وعلى الرغم من هذه الظروف البيئية القاسية توجد كائنات حية كثيرة تحورت لتكون قادرة على تحمل الضغط والتغذية في ظلام دامس، وهذه المنطقة عرضة لسقوط الفتات والأجسام الميتة التي تعطي طاقة للكائنات الحية الدقيقة المترممة Saprophytic والتي تسكن هذه المنطقة والمكونة من المحللات.

إن الإنتاج الأولي بواسطة البلانكتون يشكل نحو 90% من إنتاج البحر والمتبقي هو 10% مسؤول عنه المنتجات الجالسة كالطحالب الحمراء والبنية والخضراء التي توجد في المناطق الساحلية

والرف القاري، حيث تتوافر السطوح المناسبة لنموها، وبعد غطاء طحالب البحر وممتدًا إلى منطقة الرف القاري تنتشر الدياتومات والدينوفلاجيليت، حيث تنتشر الأولى في البحار المعتدلة، بينما تنتشر الأخيرة في مناطق خط الاستواء، وتوجد الطحالب الخضراء والحمراء الخيطية مطمورة في البنيان المرجاني، حيث تساعد هذه الطحالب على تقويم البنيان المرجاني؛ وذلك لمساعدة البوليب المرجاني على تكوين الهيكل الخارجي الصلب من مادة الجير (Pelczar et. al. 1993, Peleg et. al. 2010).

هـ - منطقة الشعاب المرجانية.

هي مجتمعات توجد عادة في المحيطات المدارية مكونة كشرائط حول الجزر أو مكونة جزرًا حلقية أو شعابًا حاجزية بعيدة عن الشاطئ، والمرجان هو حيوان جوفمعوي ذو علاقة بالأسماك الهلامية وشقائق النعمان، وهو يكون مستعمرًا ذا هيكل خارجي مكونًا من كربونات الكالسيوم، وتوجد في داخل خلايا المرجان كثير من خلايا الطحالب المتعايشة (الدينوفلاجيليت) حيث تقوم الطحالب بتموين الغذاء، ومقابل ذلك يعطي المرجان هيكلًا مدعمًا لنمو الطحالب وكذلك مواد مغذية، وهناك أيضًا بعض التعاون بين الطحالب الخضراء الخيطية والمرجان لتكون الهيكل الخارجي للمستعمرات.

التربة Soil

تشكل التربة الجزء الأعلى من سطح الأرض، ويعبر عن التربة الزراعية بطبقة الحراثة، وهي التي تصل إلى عمق متر واحد تقريبًا من قشرة الأرض السطحية، والتربة تختلف اختلافًا كبيرًا من مكان لآخر ومن بيئة إلى أخرى من حيث اللون والتركيب الكيميائي والفيزيائي والقوام والمحتوى الرطوبي وغير ذلك من الخصائص البنائية، وتتكيف الكائنات الحية مع خصائص التربة التي تعيش عليها من حيث الاحتياجات الغذائية والعوامل الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، وتتكون التربة نتيجة لتفتت وتحلل الصخور والمواد النباتية والحيوانية، ويشغل الفراغات التي تتخلل حبيباتها -جزئيًّا- الهواء والماء. وفي المناطق الجافة تسود العوامل الفيزيائية والعوامل الكيميائية في تكوين التربة، بينما يحدث العكس في المناطق الرملية، وتختلف نسبة المادة العضوية باختلاف نوع التربة، ففي الأراضي الرملية الصحراوية تصل نسبة المادة العضوية إلى الحد الأدنى، وتزداد نسبتها في أراضي الغابات، حيث يكون الغطاء النباتي كثيفًا (Humphrey 1994 .(Miller & Bassler 2001, Hyde et. al. 2006, Ibrahim et. al. 2008, Jard et. al. 2011)وتشمل عمليات تكوين التربة Soil Formation القوى الطبيعية التي تؤدي إلى التفتيت والتغيير الكيميائي للأشياء المحيطة بنا (أبو الفتح 1991م). وتؤدي الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في التربة دورًا مهمًّا في تحليل بقايا النباتات والحيوانات، وينتج عن ذلك تحرر العناصر الغذائية في التربة، إضافة إلى تكوين ثاني أكسيد الكربون والمواد العضوية المستمدة التي تساعد على تحلل التربة، وتتركب التربة

من حبيبات تختلف في أحجامها، ويمكن فصل حبيبات التربة إلى مجاميع مختلفة على أساس حجم الحبيبات، ويتكون قوام التربة Soil Texture من حبيبات ذات أحجام مختلفة، وهي الحصى والرمل والغرين والطين، ومن أهم العوامل التي تؤثر في الكائنات الحية الدقيقة والنباتات التي تعيش عليها النسب بين أوزان هذه المجاميع من حبيبات التربة، وهو ما يعرف بالتركيب الميكانيكي، وهو ما يُقصَد به عملية فصل هذه المجاميع المكونة للتربة وتعيين وزن كل منها، ثم رسم مثلث قوام التربة الذي يحدد نسب كل مكونات التربة (Mick Crawley 1996).

والمقصود ببناء التربة Soil structure هو ترتيب الحبيبات أو الهيئة التي تتجمع بها حبيبات التربة بعد حرثها، ويتوقف على ذلك حجم الفراغات الذي يؤثر في درجة التهوية في التربة، وتشتمل المسامية في التربة على الجزء الذي شغله الماء والجزء الذي يشغله الهواء، وتصل المسامية عادةً إلى 50%، وتنخفض هذه النسبة في الأراضي الرملية، وترتفع في الأراضي الطينية، ولا يمكن معرفة درجة التهوية في التربة من المسامية وحدها، بل يجب لمعرفة ذلك تعيين حجم الفراغات، إذ إن الفراغات الواسعة غير الشعرية هي التي يشغلها الهواء بعد رشح الماء الذي يعقب سقوط الأمطار أو الري

(أبو الفتح 1991م). والفراغات الضيقة الشعرية هي التي يشغلها الماء الشعري في معظم الأوقات، ويتعذر مرور الهواء فيها، وتحدد نسبة الفراغات الشعرية كمية الماء الذي تحتفظ به التربة عقب الري أو سقوط الأمطار.

وتُعدّ التربة النموذجية هي التي تكون فيها نصف المسامية من فراغات غير شعرية تسمح بمرور الغازات والنصف الآخر من فراغات شعرية تحتفظ بنسبة وافرة من الماء، وأما التربة التي تحتوي على نسبة عالية من الفراغات غير الشعرية ونسبة ضئيلة من الفراغات الشعرية؛ وذلك لكبر حجم حبيباتها فتُعدّ جيدة التهوية وقليلة الاحتفاظ بالماء، وتُعدّ هذه الصفة الأخيرة من أبرز عيوب التربة الرملية، والتربة الطينية ذات الحبيبات الدقيقة المنفردة على العكس رديئة التهوية وكثيرة الاحتفاظ بالماء، ولكي تعالج رداءة التهوية في الأراضي الطينية يضاف إليها مواد عضوية أو جيرية، إذ إن هذه المواد تعمل على تجميع الحبيبات الدقيقة على صورة حبيبات مركبة تحصر بينها فراغات واسعة، وبذلك تزداد نسبة الفراغات غير الشعرية، ومن ثم تتحسن التهوية في هذه الأراضي.

وهناك نوع من الأراضي الطينية عندما تبتل تنتفخ حبيباتها بدرجة كبيرة، وتسد جزءًا من مسامها، وتصبح رديئة التهوية، ولا تصلح لنمو الجذور فيها، وتزداد المسامية في التربة بتحلل الجذور التي تخترقها تاركة القنوات التي كانت تشغلها فارغة، وبذلك تملؤها الغازات، وكذلك تعمل حركة الديدان في التربة على زيادة المسامية فيها، وتؤدي عملية الحرث إلى تفكيك الطبقة السطحية للتربة، فتتباعد حبيباتها، وتزداد التهوية.

ويقصد بتفاعل التربة Soil Reaction؛ أي درجة تركيز أيون الهيدروجين في محلول التربة، ويعبر عن تفاعل التربة أو حموضة التربة بالرقم الهيدروجيني (pH)، وتُعدّ التربة حامضية إذا كانت أيونات الهيدروجين في محلول للتربة أعلى في تركيزها من أيونات الهيدروكسل، وتُعدّ التربة قاعدية إذا كانت أيونات الهيدروكسيل في محلول للتربة أعلى في تركيزها من أيونات الهيدروجين، ويتساوى تركيزهما في التربة المتعادلة، وتتأثر كمية المحصول - لدرجة كبيرة - بالرقم الهيدروجيني للتربة، وتشير الدراسات والأبحاث البيئية إلى أن الرقم الهيدروجيني المناسب لنمو معظم النباتات هو الواقع بين 5,6 - 5,7؛ أي إن التربة الضعيفة الحامضية أو القلوية هي الملائمة لنمو معظم الكائنات الحية الدقيقة من بكتيريا وفطريات وطحالب (Cowan et. al. 1991, Bamford et. al. 2009, Diep 2006, Douglas 2003, Faust & Raes 2012).

وتكون الطبقة السطحية من التربة عادة أكثر حموضة من الطبقة تحت السطحية؛ ويرجع ذلك إلى وجود الأحماض الناتجة من تحلل المواد العضوية في الطبقة السطحية، ولتسرب الماء الذي يحمل القواعد من الطبقة السطحية للتربة إلى الطبقات السفلى، وإن للتضاريس تأثيرًا كبيرًا في الرقم الهيدروجيني للتربة، فعند قمم التلال يقل الرقم الهيدروجيني عنه في الوديان؛ ويرجع ذلك إلى أن الأمطار تحمل القواعد من المرتفعات إلى المنخفضات، حيث تتجمع فيها، والتربة في المناطق الجافة الحارة تختلف ما بين المتعادلة وشديدة القلوية؛ وذلك لقلة سقوط الأمطار، وهذا من شأنه إبقاء القواعد في الطبقة السطحية دون تسربها، وأيضًا لقلة تكوين الأحماض الناتجة من تحلل المواد العضوية، وأما التربة في المناطق الباردة الغزيرة الأمطار فتختلف ما بين الحامضية البسيطة والحامضية الشديدة، ومن الجدير بالذكر أنه ثبت أن هناك علاقة بين الرقم الهيدروجيني وبعض الخواص الطبيعية والكيميائية للتربة (Stern 2000).

وتوجد علاقة أيضًا بين الرقم الهيدروجيني والخواص الطبيعية للتربة، فمن المعروف أن الحبيبات الغروية في التربة تحمل شحنات سالبة على سطحها، وهذه الشحنات لا تتعادل إلا إذا تجمعت على سطح الغروية الأيونات القاعدية خاصة ثنائية التكافؤ، مثل الكالسيوم والمغنيسيوم، وأما أيونات الهيدروجين فلا تكفي لتعادل هذه الشحنات السالبة، ففي التربة شديدة الحامضية تكون كمية أيونات الكالسيوم والمغنسيوم غير كافية لتعادل الشحنات السالبة الموجودة على سطح الحبيبات الغروية، وبذلك تبقى الأخيرة في حالة تنافر، ولا تتجمع لتكون حبيبات مركبة ما يؤدي إلى قلة نفاذية التربة للماء ورداءة تهويتها.

وفي التربة القريبة من نقطة التعادل تستطيع أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم معادلة الشحنات السالبة الموجودة على سطح الحبيبات الغروية، وعندئذ تتجمع هذه الحبيبات البسيطة لتكون حبيبات مركبة، وتصبح التربة منفذة للماء وجيدة التهوية، وفي التربة شديدة القلوية يزداد عدد أيونات الصوديوم والبوتاسيوم الموجودة على سطح الحبيبات الغروية ما يؤدي إلى تنافرها وعدم تجمعها، وهذا من

شأنه إفساد الخواص الطبيعية للتربة (Oladipo et. al. 2018, Li, Y & Tian 2016, Partida-Martinez et. al. 2007).

ملوحة التربة Soil salinity

تختلف الكائنات الحية الدقيقة فيما بينها من حيث درجة تحملها لملوحة التربة، فهناك كائنات حية دقيقة تنمو في الماء المالح أو الأراضي التي تحتوي على نسبة عالية من الأملاح، وتعرف هذه المجموعات بالملحية Halophytes، والنوع الثاني كائنات حية دقيقة لا تستطيع أن تعيش إلا في الأراضي التي تحتوي على نسبة قليلة من الأملاح، وتسمى الوسطية Mesophytes، إضافة إلى كائنات حية دقيقة تستطيع أن تعيش في كلتا البيئتين، وتعرف هذه بالملحية الاختيارية Facultative Halophytes.

ويتأثر توزيع الأملاح في الطبقات المختلفة من التربة باختلاف العوامل الجوية في الفصول المختلفة، ففي فصل الجفاف يتبخر الماء على سطح التربة، ويتحرك الماء الشعري إلى أعلى عند السطح حيث يتبخر، وباستمرار عملية التبخر تتجمع الأملاح في الطبقات السطحية، وفي الفصل الذي تسقط فيه الأمطار يحمل ماء المطر -في أثناء رشحه- الأملاح من الطبقات السطحية إلى الطبقات العميقة، ومن العوامل التي تساعد على تراكم الأملاح على سطح التربة وجود طبقة صلبة أو غير منفذة للماء بالقرب من السطح، وكذلك فإن قرب مستوى الماء Water table من السطح الأرضي يعمل على تراكم الأملاح أيضًا (Bos1983, Alexandre et. al. 2004, Bouyahya et. al. 2017).

وإن زيادة تركيز الأملاح المتعادلة تتبعه زيادة في الضغط الأسموزي لمحلول التربة، وهذا بدوره يؤثر في نمو ووجود الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في التربة، فتأثير الأملاح يكون عن طريق رفعها للضغط الأسموزي لمحلول التربة، ولكن هناك نوع آخر من التأثير الخاص ببعض الأملاح لا تقل أهميته كثيرًا عن السابق متمثلًا في العمليات الفسيولوجية والبيوكيميائية للكائنات الحية الدقيقة، وتتناسب درجة تحمل الكائنات الحية الدقيقة للأملاح مع درجة انتشارها وكثرتها في الطبيعة، فكلما قل انتشار ملح من الأملاح في الطبيعة، قلت قدرة الكائنات الحية الدقيقة على تحمل هذا الملح حتى في محاليله المخففة، ومثال ذلك التأثير السام الذي ينجم عن وجود أملاح كبريتات النحاس حتى في محاليل مخففة في الوقت الذي تتحمل فيه الكائنات الحية الدقيقة العادية محاليل من كبريتات الكالسيوم يصل تركيزها إلى درجة عالية (Burmolle et. al. 2006, Al-Falih 1997, Cavaliere et. al. 2017).

وإن للدبال دورًا مهمًا في تحسين خواص التربة الطبيعية والكيميائية، فهو يعمل على زيادة قدرة التربة على الاحتفاظ بالماء، ويقلل من فقدان الماء بالتسرب السفلي إلى الأعماق، ويزيد من تهوية التربة خاصة التربة الطينية الثقيلة، ويحسن بناء التربة، إذ إنه يعمل على تكوين الحبيبات المركبة،

وبذلك يقلل من الخسارة الناتجة عن عوامل التعرية بفعل الرياح، ويحسن الدبال من الخواص الكيميائية للتربة، إذ إنه يجعل من التربة مخزنًا يمد النباتات بالمركبات النيتروجينية تدريجيًّا، وإنه يساعد على تكوين الأحماض العضوية وغير العضوية التي تعمل بوصفها مذيبات للعناصر المعدنية المهمة للنباتات، وكذلك تكوين ثاني أكسيد الكربون، ثم حامض الكربونيك، وهو مذيب قوي أيضًا للعناصر المعدنية، وإن للطبيعة الغروية للدبال أثرها الكبير في الاحتفاظ بمكونات الأسمدة والعناصر الغذائية المعدنية على سطوح الدبال الغروية، ويتجنب فقدانها بالرشح، وللمادة العضوية أثر كبير في نشاط الكائنات الحية الدقيقة في التربة، إذ إن هذه الكائنات تحول المواد الغذائية في التربة إلى صورة مواد وعناصر بسيطة يمكن امتصاصها بواسطة النباتات واستغلالها (Wainwright and Al-Falih 1996).

الفصل الخامس

التفاعلات بين الأحياء الدقيقة

Interactions among Microorganisms

- ◄ التفاعلات بين جماعات الأحياء الدقيقة.
  - ● أولاً: التفاعل بين أفراد الجماعة الواحدة.
  - ● ثانياً: التفاعل بين الجماعات المختلفة.
- ◄ المضادات الميكروبيولوجية.
- ◄ المقاومة الميكروبيولوجية.

الفصل الخامس

التفاعلات بين الأحياء الدقيقة

Interactions among Microorganisms

في النظام البيئي يطلق على العلاقة بين الأحياء الدقيقة والكائنات الحية الأرقى مصطلح العوامل الأحيائية Biotic factors، وهي من العوامل المهمة التي تؤثر في الكائنات الحية الدقيقة، إذ لا يخلو كائن حي من وجود صلة بينه وبين كائن حي آخر، سواء كان نباتًا أم حيوانًا، فمثلًا تعتمد نباتات الفصيلة البقولية Leguminosea على بكتيريا العقد الجذرية في الحصول على احتياجاتها من النيتروجين، ويوجد بين الكائن الحي وبين ما يجاوره من كائنات حية أخرى تنافس في الحصول على ما يلزمها من مواد غذائية وماء وضوء (Bashan 2004 al. et.).

وتتنوع التفاعلات البيئية للأحياء الدقيقة، وتختلف باختلاف الأطراف المشتركة في التفاعل، فهناك التفاعلات بين جماعات الأحياء الدقيقة Interactions between microbial populations، وكذلك التفاعلات التي تتم بين الأحياء الدقيقة والنباتات Interactions between Microorganisms and plants، إضافة إلى التفاعلات الأخرى التي عادة ما تتم بين الأحياء الدقيقة من جهة وبين الحيوانات من جهة أخرى Interactions between Microorganisms and animals، التي منها ما يكون في التربة أو في الماء أو حتى داخل جسم الإنسان والحيوانات الراقية.

وتتباين العلاقة بين الكائنات الحية، فهي إما أن تكون مبنية على تبادل المنفعة بين الطرفين أو تعود بالنفع على أحدهما والضرر على الآخر، فتؤدي الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في التربة دورًا مهمًا في تحليل بقايا النباتات والحيوانات، وينتج عن ذلك تحرر العناصر الغذائية في التربة، إضافة إلى تكوين ثاني أكسيد الكربون والمواد العضوية المستمدة التي تساعد على تحلل التربة، وبذلك تسهم الأحياء الدقيقة في توفير العناصر الغذائية اللازمة لنمو الكائنات الحية الأخرى الأرقى منها المتمثلة في النباتات بجميع أنواعها. هذا إضافة إلى كثير من العلاقات الغذائية التي تنشأ بين الكائنات الحية الدقيقة والكائنات الحية الأرقى مثل النباتات والحيوانات.

وعادة ما يكون التفاعل السائد داخل الجماعة الواحدة هو التعاون Cooperation وذلك في ظل انخفاض الكثافة العددية وانتفاء التزاحم على مصادر الغذاء والحيز البيئي، ويتطلب تحقيق التعاون وجود تجمع للأفراد داخل الجماعة؛ لذا فإن انتشار المستعمرات الميكروبية في المواطن الطبيعية يُعدّ دليلًا على التنافرات التي حصلت فيما بينها داخل الجماعة، وأما الجماعات ذات الكثافة العالية من الأفراد فيسود فيها التنافس Competition وهذا بدوره يقود إلى التشتت Dispersal، ومن الممكن أن تظهر جماعتان من الأحياء الدقيقة أنواعًا مختلفة من التفاعلات فيما بين أفرادها، وفي

المقابل تسود الحيادية Neutralism عندما لا تكون هناك فرص للتفاعل بين الجماعات (Atlas and Bartha 1993)، وهذا الأمر يمكن تحقيقه بالفصل الفيزيائي أو الفصل المؤقت للأنشطة الأيضية لأفراد الكائنات الحية الدقيقة داخل الجماعة، وهذا الأسلوب مفضل في الجماعة قليلة الكثافة وقليلة مستويات النشاطات الأيضية.

وإن علاقة التعايش Commensalism التي تكون حيادية لجماعة ومفضلة لجماعة أخرى تقوم على استمرار التغيرات الكيميائية أو الفيزيائية للموطن البيئي الذي يُوجَد فيه الكائن الحي، فهناك استمرار إنتاج عوامل النمو وإنتاج المواد وتنقلات عوامل النمو أو المواد واستبعاد المثبطات وغيرها كثير، فكل هذه تؤثر مجتمعة أو منفردة في علاقة الأحياء الدقيقة بعضها ببعض، وتفيد علاقة التعاون Synergism كل المجموعات المتفاعلة، وتسمح بأنشطة جديدة أو تسرع من الأنشطة القائمة بين المجموعات الميكروبية المتفاعلة مع بعض، وتتيح للأحياء الدقيقة فرصة اتحاد أنشطتها الأيضية لتشكيل تنقلات للمواد التي لا يمكن أن تحدث في المجموعة المنفردة، وإن علاقات التعاون يمكن أن تفيد في تفاعلات دورات المعادن وتنشيطها، وكذلك تُعدّ قاعدة مهمة لتطوير بناء المجتمع، وتُعدّ علاقة التقايض Mutualism امتدادًا للتعاون التي تتيح للجماعات أن ترتبط في علاقة إجبارية لتكوين وحدة جماعة مفردة بإمكانها غزو واحتلال موطن قد لا يكون متاحًا، ولا تستطيع جماعة الوصول إليه بمفردها.

ويُعدّ التنافس Competition تفاعلًا سلبيًّا بين جماعات الأحياء الدقيقة، والملاحظ أن التنافس يكون كبيرًا بين الجماعات الميكروبية التي تشغل المكان البيئي نفسه، وتتزاحم عليه، والتنافس الناجح خلال ظروف النمو هو الذي يقود إلى معدل النمو الحقيقي العالي تحت الظروف البيئية المناسبة، وأما إذا كانت الظروف البيئية غير مناسبة فإن التنافس الناجح هو الذي يساعد الكائن الحي على زيادة قدرته على التحمل والبقاء على قيد الحياة، وفي حال استقرار أو ثبات الظروف البيئية فإن التنافس عادة ما يؤدي إلى تأسيس الجماعات السائدة وإقصاء Exclusion الجماعات غير الناجحة في التنافس، ولا يتم الإقصاء في الأماكن أو البقع المؤقتة التي تقل فيها تفاعلات التنافس لتوافر المصادر، وتنوع الظروف البيئية يُوجِد عوامل أو فرصًا تسمح بوجود الجماعات المتنافسة (Wani et. al. 2007).

ويمكن أن تدخل جماعات الأحياء الدقيقة في علاقات تبادلية مع جماعات أخرى من خلال أي تغيير يطرأ على الموطن قد يؤدي إلى إنتاج مواد كيميائية سامة لبعض أفراد هذه الجماعات، فهذه العلاقات التبادلية قد تقوم في بعض الحالات على أساس تغير في تركيز المركبات غير العضوية مثل الأوكسجين، والأمونيا، والأحماض المعدنية، وكبريتيد الهيدروجين، وفي حالات أخرى قد تنشأ هذه العلاقات بسبب إنتاج مركبات عضوية منخفضة الوزن الجزيئي مثل الأحماض الدهنية أو الكحولات، وفي معظم البيئات الطبيعية يصعب توضيح دور المضادات الحيوية Antibiotics في العلاقات التبادلية بين جماعات الأحياء الدقيقة، ولكن هذا لا يحول دون القول: إن المضادات

الحيوية تؤدي دورًا بارزًا وملحوظًا في تأسيس العلاقات التبادلية، وذلك تحت ظروف معينة في البيئات الطبيعية.

ويمارس التطفل Parasitism تأثيرًا سلبيًا في العائل سريع التأثر Susceptible host في الجماعات، وفي المقابل يحقق التطفل فائدة للطفيل Parasite فقط، وتعتمد جماعات الأحياء الدقيقة المتطفلة في احتياجاتها الغذائية على العائل بشكل كبير، خصوصًا عندما تكون إجبارية التطفل Obligate parasite، بينما غير إجبارية التطفل قد يكون لها ميكانيكية بديلة لتلبية احتياجاتها الغذائية، وبشكل عام فإن التطفل يُعدّ آلية طبيعية للتحكم في كثافة الجماعة في النظام البيئي، فالتطفل يقدم فوائد على المدى الطويل لجماعات العوائل والنظام البيئي ككل، وكذلك الحال بالنسبة إلى علاقة الافتراس Predation بين المفترس Predator والفريسة Prey، فعملية الافتراس مفيدة للمفترس ومضرة بأنواع الفريسة، وعلى الرغم من ذلك، فيُعدّ الافتراس والتطفل طريقتين طبيعيتين للتحكم في الجماعات وعدم السماح بازدهار جماعة معينة على حساب جماعات أخرى ما يضر بالتوازن البيئي في النظام البيئي، ويعرضه للتهدم والدمار، وإن هاتين العمليتين تنظمان التغذية، فمن دونهما قد تستنزف المصادر الطبيعية للغذاء، وفي نفاده هلاك لجماعات وأفراد النظام البيئي بشكل عام (Subbarao 1981. Willsey et. al. 2017. Sullia 2000 Tshikantwa et. al. 2017).

التفاعلات بين جماعات الأحياء الدقيقة
Interactions between microbial populations

لا توجد الأحياء الدقيقة بمفردها في تجمعات مستقلة بشكل طبيعي في البيئات المتنوعة، بل تعيش الأحياء الدقيقة بشتى جماعاتها وأنواعها في البيئة الطبيعية مع مختلف الكائنات الحية الأخرى، وتؤثر فيها وتتأثر بها سلبًا وإيجابًا، ويتعذر بل يستحيل وجود كائن حي بمفرده في أي مكان أو حيز بيئي بشكل طبيعي، بل حتى في المختبر لو تمكن باحث من عزل خلية ميكروبية مفردة، فإنها لا تلبث أن تنقسم وتتضاعف بسرعة لتشكل مستعمرة بها عدد كبير من الخلايا لتشكل جماعة تعيش سويًّا في الوسط الغذائي الصناعي نفسه، ففي البيئات الطبيعية تتعاون جماعات الأحياء الدقيقة المتنوعة ذات الخصائص المتباينة لتشكل مجتمعًا حيويًّا تنمو وتتكاثر من خلاله، وتقيم فيما بينها علاقات تبادلية، والمكان المحدد الذي تعيش فيه هذه الجماعات من الكائنات الحية الدقيقة يعرف بالموطن Habitat، والمجتمع الحيوي هو مركب تشترك في بنائه كل الجماعات الميكروبية، وتتعاون في رعايته لتعيش في إطاره بشكل تناغمي، ويحدث التفاعل السلبي والتفاعل الإيجابي بين أفراد الجماعة الواحدة وكذلك بين الجماعات الميكروبية المتنوعة في المجتمع الحيوي، وتسمح هذه التفاعلات لبعض الجماعات بأن تنمو حتى تصل إلى حجم مثالي وفق المصادر الغذائية المتاحة في الموطن الذي تعيش فيه، وتُعدّ التفاعلات المتبادلة بين جماعات الأحياء الدقيقة عملية جوهرية وضرورية لحفظ التوازن البيئي في النظام البيئي للمجتمع الحيوي (Czarnes 2000 al. et.)،

وسوف تتم مناقشة آليات وطرق هذه التاعلات بشيء من التفصيل؛ وذلك لتتضح للقارئ درجة التعقيد والترابط بين مكونات المجتمع الحيوي، وكيف يعتمد كل منها على الآخر.

أولًا: التفاعل بين أفراد الجماعة الواحدة

إن كل التفاعلات السلبية والإيجابية قد تحدث حتى في الجماعة الواحدة نفسها من الأحياء الدقيقة، وهذه التفاعلات المتبادلة تعتمد على كثافة الجماعة، ولوحظت في الأصل في النباتات والحيوانات، فكلما زادت كثافة الجماعة زادت التفاعلات التبادلية بحكم تقارب الأفراد وتزاحمهم على مصادر الغذاء، فإذًا هذه علاقة طردية بين الجماعة وكثافتها من جهة وبين وجود مثل هذه التفاعلات من جهة أخرى، وبشكل عام فإن التفاعلات الإيجابية تزيد من معدل النمو للجماعة، بينما تقلل التفاعلات السلبية من معدل النمو في الجماعة، فمع زيادة كثافة الجماعة فإن التفاعل الإيجابي نظريًا يزيد من معدل النمو لبعض الجماعات إلى حد معين (Gregory 1973). وفي المقابل تقلل التفاعلات السلبية من معدل النمو كلما زادت كثافة الجماعة.

وعمومًا تسود التفاعلات الإيجابية (التعاونية) في الجماعة قليلة الكثافة، وتسود التفاعلات السلبية (التنافسية) في الجماعات عالية الكثافة، ونتيجة لذلك هناك كثافة مثلى للجماعة لمعدل النمو الأعلى، وتتأثر بقوة معدلات النمو Growth rates إذا كانت تحت Below الكثافة المثلى Optimal density بالتفاعلات الإيجابية، وتتأثر بقوة معدلات النمو إذا كانت فوق Above الكثافة المثلى بالتفاعلات السلبية.

التفاعلات الإيجابية Positive interactions

تسمى التفاعلات الإيجابية داخل الجماعة، التعاونية (Cooperation)، ويكون التعاون داخل الجماعة الميكروبية ظاهرًا للعيان من خلال إطالة مدة التباطؤ أو الفشل الكلي للنمو، وذلك عند استخدام لاقحة صغيرة جدًّا في الخطوات المعتادة لنقل المزرعة، وهذا صحيح خصوصًا للأحياء الدقيقة انتقائية التغذية، ويُعدّ عقبة كبيرة لكل خطوات العزل التي تحتاج إلى نمو خلية ميكروبية مفردة في المستعمرات، وهناك شك بسيط في أن الجماعات متوسطة الكثافة تكون أكثر نجاحًا بشكل عام من الأحياء الدقيقة المفردة في عملية استعمار أو غزو المواطن الطبيعية، والمثال الذي دُرِس، وتناوله كثير من الباحثين في هذا الشأن هو تحديد الجرعة الدنيا للإصابة بالميكروبات الممرضة في جماعات الأحياء الدقيقة المختلفة، وعادة ما يحتاج الأمر إلى مشاركة آلاف الميكروبات الممرضة لحدوث الإصابة بالمرض، فالميكروب المفرد نادرًا جدًّا ما يكون قادرًا على اجتياز دفاعات أو وسائل حماية العائل كلها.

ويحدث التعاون في الجماعة بسبب أن الأغشية الخلوية شبه المنفذة للأحياء الدقيقة تكون غير تامة، وتميل إلى تسريب المواد الأيضية منخفضة الأوزان الجزيئية التي تُعدّ أساسية لعمليات البناء والنمو

الخلوي للكائن الحي، فالخلية الميكروبية المنفردة أو الجماعة قليلة الكثافة قد يتجاوز فيها الفقد أو التسريب معدل التعويض ما يعيق أو يمنع النمو بشكل عام، والحقن الوافر أو الكثيف الذي يكفي جماعة كبيرة يكون قادرًا على ضبط الوسط غير المناسب، علمًا أن الخلية المنفردة أو الجماعة الصغيرة من الأحياء الدقيقة غير قادرة على القيام بمثل هذه الآلية، ويمكن علاج مثل صعوبات العزل هذه، وذلك بتحضير راشح معقم من وسط غذائي مشبع ومجهد وإدراج هذا الراشح بوصفه جزءًا أساسيًّا من البيئة الجديدة التي تعزل عليها الخلايا المفردة من الكائنات الحية الدقيقة غير ذاتية التغذية(Currie et. al. 1999, Gudlaugsson et. al. 2003, Dalié et. al. 2010, De Vuyst & Neysens 2005).

ويعتمد تكوين المستعمرة من الجماعات الميكروبية على قدرتها على التأقلم مع التفاعلات التعاونية في الجماعة، وحتى البكتيريا المتنقلة Motile bacteria التي لديها القدرة على الانتقال بعيدًا عن بعضها تبقى في المستعمرات، وعادة ما يلاحظ أن المستعمرات الصغيرة علاوة على الأحياء الدقيقة المفردة تلتصق بالجزيئات الدقيقة، ويسمح اتحاد الجماعة في المستعمرة باستخدام المصادر الغذائية المتاحة بكفاءة، وبعض المستعمرات البكتيرية حتى وإن أظهرت تحركات كبيرة فإنها تدور في المكان نفسه أو تهاجر إلى ممر حلزوني، وهذا النوع من الهجرة يُعدّ نتيجة إيجابية للكائن الحي في المستعمرة، ويفيده في البحث عن مصادر غذائية جديدة (et. al. 2004 Domenech).

تُلاحَظ بوضوح عملية التوسع في التفاعلات التعاونية داخل الجماعة لدى بعض الفطريات مثل فطر Dictyostelium، فهذا النوع من الفطريات عندما يقل الغذاء في الوسط الذي تعيش فيه، فإن خلاياها تتجمع في وسط الكائن الحي، وهذه الطريقة من التجمع أو الحشد لخلايا الكائن الحي تُعدّ استجابة للتحفيز الكيميائي لمركب الطاقة AMP الذي يتحرر ويتدفق على شكل موجات في الخلايا، ثم تتحد الخلايا لتكوين جسم ثمري وجراثيم تتشتت فيما بعد، وإن بعض الجراثيم خلال هذه الميكانيكية تصل باستمرار إلى مواطن تزخر بغذاء وافر وإمداد جيد، ما يتيح لها فرصة النمو والتكاثر وإعادة دورة الحياة، وإن الاتصال بين أعضاء جماعة الأحياء الدقيقة يسمح لها بالتعاون والبحث واستخدام المصادر الغذائية في موطنها الموجودة فيه، وقد أشار العلماء (Shimkets 1990) إلى هذا النوع من التفاعل التعاوني لجماعات البكتيريا Myxobacteria.

وإن التفاعلات التعاونية داخل جماعات الأحياء الدقيقة قد تكون مهمة، خصوصًا عندما تستخدم الجماعة مواد غير قابلة للذوبان Insoluble substrate مثل اللجنين أو السليلوز، فإن الأنزيمات الخلوية الخارجية Extracellular enzymes التي تفرزها بعض أفراد الجماعة الميكروبية تحلل المواد غير القابلة للذوبان، وتجعلها متاحة لجميع أفراد الجماعة، وإن المنتجات الذائبة التي تتحرر بواسطة مثل هذه الأنزيمات يمكن فقدها من الوسط بسرعة في الجماعات قليلة الكثافة، وذلك من خلال عملية التخفيف، في حين أن الجماعات الميكروبية عالية الكثافة عندما تتحرر في وسطها الغذائي مثل هذه المواد الذائبة فإنها تستخدم بكفاءة عالية، وكمثال على ذلك بكتيريا

Myxobacteria التي تتغذى على مواد غير ذائبة؛ لما لديها من قدرة على إفراز أنزيمات خارجية Exoenzymes لإذابة هذه المركبات وجعلها متاحة في وسطها الغذائي، وأيضًا من صور إذابة المواد بشكل تعاوني إيجابي بين الأحياء الدقيقة ما لدى بعض أفراد جماعات الكائنات الحية الدقيقة من قدرة على إفراز أحماض عضوية تذيب المواد غير العضوية في مواطن محددة داخل الجماعة مثل التربة وسطوح الصخور، فتجعل بذلك المعادن الأساسية متوافرة ومتاحة لجميع أفراد الجماعة.

ويمكن توظيف التعاون الإيجابي داخل جماعة الأحياء الدقيقة واستخدامه بوصفه وسيلة حماية ضد العوامل البيئية في موطنها الطبيعي (Walsh et. al. 2001, Ryan et. al. 2011). ويلاحظ في المختبر بشكل عام أن المثبط الأيضي Metabolic inhibitor يكون تأثيره قليلًا إذا كان المعلق الميكروبي خلاياه كثيفة، بينما يكون تأثير المثبط عاليًا في حال استخدام معلق ميكروبي مخفف، وكذلك الحال بالنسبة إلى المضادات الميكروبية Antimicrobial agents حيث يكون تأثيرها في المعلق أكبر بكثير من تأثيرها في المستعمر في المزرعة المليئة بالكائنات الحية الدقيقة.

وفي البيئات الطبيعية المعرضة للشمس وللأشعة فوق البنفسجية، فإن كثافة جماعات الأحياء الدقيقة تقيها من ضرر هذه الأشعة، حيث تشكل الكائنات الحية الدقيقة درعًا واقيًا من بعض أفرادها يحميها، وتستمر البقية في النمو والتكاثر حتى في العراء والبيئات المكشوفة (Viljoen 2001, Schlegal 1993). وأيضًا يُلاحَظ أن وجود الأحياء الدقيقة في جماعات كثيفة يجعلها قادرة على خفض درجة تجمد الماء بما يسمح لها باستمرارية النمو عند هذه الدرجة المتدنية من الحرارة وتوفير الماء على هيئة سائل لاستخدامه في عملياتها الفسيولوجية داخل الخلايا بوصفه وسطًا مذيبًا بشكل فعال.

وإضافة إلى ما سبق، فإن التبادل الوراثي Genetic exchange يُعدّ كذلك صورة من صور التفاعل التعاوني داخل جماعة الأحياء الدقيقة، وإن مقاومة المضادات الحيوية ومقاومة سمية المعادن الثقيلة والقدرة على استخدام مواد عضوية، كل هذه صفات وخصائص وراثية، عادة ما يتم نقلها وتوريثها عبر أجيال أفراد جماعات الأحياء الدقيقة المتعاقبة، وهذه الظاهرة تجعل المعلومات الوراثية المطلوبة للتأقلم تنتقل إلى جميع الأعضاء داخل الجماعة، وهذا من أهم وأبرز صور التفاعل التعاوني الإيجابي بين جماعات الأحياء الدقيقة، والتبادل الوراثي مهم لمنع تجاوز الخصوصية في جماعات الأحياء الدقيقة، وهذه الميكانيكية للتبادل الوراثي تشمل عمليات النقل والتزاوج والنسخ وتشكيل الجراثيم الجنسية، وصحيح أن التبادل الوراثي يتم بين عضوين من أعضاء الجماعة، ولكنه في الواقع لا يتم إلا داخل جماعة ذات كثافة عالية، فالتزاوج البكتيري يكون بين خليتين بكتيريتين، ولكن لا يتم إلا في جماعة من الأحياء الدقيقة لا تقل كثافتها عن 10 لكل ملل ليحصل التبادل الوراثي بالتزاوج، وعندما تكون كثافة الجماعة الميكروبية منخفضة فإن احتمالية نجاح التبادل الوراثي تكون منخفضة جدًّا(Wang et. al. 2004, Shirtliff et. al. 2009, Wiedemann et. al. 2006, Sieuwerts et. al. 2008).

التفاعلات السلبية Negative interactions

تعرف التفاعلات السلبية داخل الجماعة الميكروبية باسم التنافس Competition، وذلك أن جميع أعضاء الجماعة تستخدم المصادر الغذائية نفسها، وتشغل الحيز نفسه من المكانة البيئية، فإذا استهلك أحد الأفراد داخل الجماعة جزيئًا من المادة، فلن يُعدّ هذا الجزيء متوافرًا لأي من أفراد الجماعة، وإن زيادة كثافة جماعة الأحياء الدقيقة في المواطن الطبيعية التي تُوجَد فيها المواد بتركيزات قليلة من شأنه أن يزيد من عملية التنافس بين الأفراد داخل الجماعة التي تستوطن ذلك الموطن الشحيح بالموارد، فالتنافس يحدث داخل الجماعات الميكروبية المفترسة إذا توافرت الفريسة، ويحدث التنافس داخل الجماعات الميكروبية المتطفلة إذا وجدت خلايا العائل المناسبة لتتطفل عليها الأحياء الدقيقة، وإن عدوى خلايا العائل بأحد أعضاء الجماعة الميكروبية يمهد الطريق لإصابة هذه الخلايا بأعضاء آخرين من الجماعة (Van den Hoek et. al. 1993, Ward 1989, Shi et. al. 2018).

وإضافة إلى التنافس المباشر للحصول على مصادر جيدة للغذاء، فإن التنافس بمفهومه العريض يشمل التنافس للحصول على مواد غذائية متاحة، وكذلك بقية التفاعلات السلبية مثل تلك التي تؤدي إلى تراكم المواد السامة الناتجة عن أعضاء من الجماعة، ويُلاحَظ أن الأنشطة الأيضية في الجماعات عالية الكثافة قد تؤدي إلى تراكم مواد مثبطة لبعض أفراد الجماعة نفسها، فتراكم بعض النواتج الأيضية مثل الأحماض الدهنية منخفضة الوزن الجزيئي وكبريتيد الهيدروجين تمثل ميكانيكية لتغذية راجعة سلبية، ووُجِد أن تراكمات مثل هذه النواتج الأيضية في الوسط الغذائي تحدّ من فاعلية النمو الإضافي لبعض جماعات الأحياء الدقيقة، حتى ولو كانت المواد الغذائية متاحة في البيئة (Botelho and Mendonça-Hagler 2006).

ويمكن أن أسوق بعض الأمثلة التي تؤكد مثل هذه التفاعلات التنافسية السلبية داخل الجماعة الميكروبية بسبب تراكم النواتج الأيضية، فالتراكم المفرط لكبريتيد الهيدروجين يحدّ من عملية اختزال الكبريتات، وكذلك فإن تراكم حمض اللاكتيك وأي أحماض دهنية يوقف نشاط بكتيريا Lactobacillus، وأيضًا فإن تراكم الإيثانول يوقف النشاط التخميري لدى خميرة Saccharomyces، وإن تراكم الحمض الدهني خلال عملية التحلل الحيوي للهيدروكربونات قد يوقف أي نشاط أيضي ميكروبي للمواد الهيدروكربونية.

وعند دراسة التفاعلات السلبية من الجانب الوراثي نجد أن هناك جينات أو مورثات تكون مشفرة للببتيدات أو البروتينات ذات وظائف مميتة، فبكتيريا القولون *Escherichia coli* على سبيل المثال تملك ما يُعرف بالهوك Hok الذي يكون قاتلًا للعائل (Host-killing) ومشفر للببتيدات يقوم بتدمير غشاء النقل، ويؤدي إلى موت الخلايا عندما ينقل جين الهوك، ولمنع نقل الهوك Hok expression فإن هذه البكتيريا تحمل بشكل طبيعي جينًا مضادًّا اسمه سوك Sok مانعًا للقتل

(Suppression of killing) مشفرًا لمقاومة الحمض النووي الريبوزي المراسل mRNA الذي يحول دون نقل الهوك، ووكلٌّ من الهوك القاتل والمضاد يوجدان داخل خلية الكائن الحي في البلازما Plasmids نفسها، فتبقى خلايا أفراد الجماعة الميكروبية على قيد الحياة طالما أن البلازما نشيطة وفاعلة، وتؤدي دورها بشكل تلقائي.

ثانيًا: التفاعل بين الجماعات المختلفة

إن وجود جماعات مختلفة من الأحياء الدقيقة في موطن واحد تشترك في المصادر الغذائية نفسها، وتشغل المكانة البيئية نفسها، فذلك من شأنه أن يُوجِد أنواعًا متباينة من العلاقات المتبادلة بين تلك الجماعات، وتصل هذه العلاقات أشد وأقصى صورها عندما تكون المصادر الغذائية محدودة والجماعات الميكروبية ذات كثافة عددية عالية، وفي المقابل تتضاءل حدود هذه العلاقات التفاعلية في الجماعات غير الكثيفة وفي حال وفرة الغذاء، وعندما تتفاعل جماعتان من الأحياء الدقيقة في الموطن نفسه، فإن إحداهما أو كلتيهما تستفيدان من هذه العلاقة، أو قد تتضرران كلاهما، وقد يقتصر الضرر على إحداهما من هذه العلاقة كما في الجدول رقم (5-1) الآتي:

الجدول (5-1): يبين تأثير العلاقات التفاعلية بين جماعتين من الأحياء الدقيقة.

نوع التفاعل	تأثير التفاعل	
	جماعة أ	جماعة ب
الحيادية Neutralism	لا يوجد	لا يوجد
التعايش Commensalism	لا يوجد	+
التعاون Synergism	+	+
التقايض Mutualism	+	+
التنافس Competition	-	-
التضاد Amensalism	+/ لا يوجد	-
الافتراس Predation	+	-
التطفل Parasitism	+	-

ومن الجدير بالذكر أن بعض الحالات قد يكون التداخل فيها كبيرًا بين أفراد جماعات الأحياء الدقيقة، وفي مثل هذه الحالة يصعب على الباحثين تحديد درجة التفاعل، خصوصًا في البيئات الطبيعية المفتوحة، ويمكن بشكل عام تقسيم التفاعلات بين جماعات الأحياء الدقيقة إلى ثلاثة أقسام رئيسة، فالعلاقة التفاعلية قد تكون سلبية Negative relationship لجميع الأطراف، وهذه تشمل التنافس Competition والتضاد Amensalism (Antagonism)، أو علاقة إيجابية Positive relationship لكل الجماعات الميكروبية مثل التعايش Commensalism والحيادية، والقسم الثالث تكون فيه العلاقة التفاعلية مفيدة لجماعة الطفيل والمفترس ومضرة لجماعة العائل والفريسة، وهذه تشمل التطفل Parasitism والافتراس Predation.

ويسود التعاون Cooperation بين الأحياء الدقيقة في حال الجماعات قليلة الكثافة Low density populations؛ وذلك لعدم التزاحم على مصادر الغذاء والحيز البيئي، ويتطلب تحقيق التعاون وجود تجمع للأفراد داخل الجماعة لتتعاون فيما بينها في بناء المجتمع الحيوي، وأما الجماعات ذات الكثافة العالية من الأفراد فيسود فيها التنافس Competition وهذا بدوره يقود إلى التشتت وانتشار المستعمرات في الموطن البيئي بصورة تجعلها متباعدة، ومن الممكن أن تُظهر جماعتان من الأحياء الدقيقة أنواعًا مختلفة من التفاعلات فيما بين أفرادها، وفي المقابل تسود الحيادية Neutralism عندما لا تكون هناك فرص للتفاعل بين الجماعات؛ وذلك إما بسبب الفصل الفيزيائي أو الفصل المؤقت لأنشطة الكائنات الحية الدقيقة داخل الجماعة، وأما التعايش Commensalism الذي يكون غير مضر لجماعة ومفيدًا لجماعة أخرى، فيقوم على استمرار التغيرات الكيميائية أو الفيزيائية للموطن البيئي الذي يُوجَد فيه الكائن الحي، وتفيد علاقة التعاون Synergism جميع المجموعات المتفاعلة، وتسمح بأنشطة جديدة أو تسرع من الأنشطة القائمة بين المجموعات الميكروبية المتفاعلة مع بعض، وتتيح للأحياء الدقيقة فرصة اتحاد أنشطتها الأيضية لتشكيل تنقلات للمواد التي لا يمكن أن تحدث لو كانت كل جماعة تعيش بمفردها بمعزل عن الأخرى، وهذا النوع من التعاون يفيد في تفاعلات دورات المعادن وتنشيطها بواسطة مجموعات متنوعة ومتعاونة من الأحياء الدقيقة ذات القدرات المتفاوتة، وتُعدّ علاقة التقايض Mutualism امتدادًا للتعاون، وتتيح للجماعات أن ترتبط في علاقة إجبارية لتكوين وحدة جماعة مفردة بإمكانها غزو واحتلال مواطن بيئية متنوعة (Al-Whaibi 2005, Van den Hoek et. al. 1993, Ward 1989, Shi et. al. 2018).

وفي المجتمعات البسيطة يمكن ملاحظة علاقة واحدة أو أكثر فيما بين الجماعات الميكروبية، بينما في المجتمعات الحيوية الكبيرة المعقدة توجد جميع صور وأشكال العلاقات المذكورة أعلاه، فالتعاون يكون منتشرًا في المجتمعات البسيطة، وأما التنافس Competition فهو تفاعل سلبي بين جماعات الأحياء الدقيقة في المجتمعات الحيوية الكبيرة، ويشتد بين الجماعات الميكروبية التي تشغل المكان البيئي نفسه، وتتزاحم عليه، والتنافس الناجح يقود إلى معدلات نمو عالية تحت الظروف البيئية المناسبة، وأما إذا كانت الظروف البيئية غير مناسبة، فإن التنافس الناجح هو الذي يساعد

الكائن الحي على زيادة قدرته على التحمل والبقاء على قيد الحياة، وفي حال استقرار الظروف البيئية أو ثباتها، فإن التنافس عادة ما يؤدي إلى سيادة الجماعات القادرة وإقصاء Exclusion الجماعات غير الناجحة في التنافس.

وتسود التفاعلات الإيجابية بين الجماعات الأصلية Autochthonous populations في المواطن الطبيعية القديمة مقارنة بالمواطن الجديدة، والمواطن التي تكثر فيها الأحياء الدقيقة الغازية Invaders تُوجَد فيها علاقات سلبية واضحة بين جماعاتها الميكروبية، ويُعدّ التطفل Parasitism علاقة سلبية بين الأحياء الدقيقة، وتعتمد جماعات الأحياء الدقيقة المتطفلة في احتياجاتها الغذائية على العائل بشكل كبير، خصوصًا عندما تكون إجبارية التطفل، وبشكل عام فإن التطفل يُعدّ آلية طبيعية للتحكم في كثافة الجماعة في النظام البيئي، فالتطفل يقدم فوائد للكائن الحي المتطفل وضررًا للعائل، وتُعدّ التفاعلات السلبية تغذية راجعة أو مؤشرًا يحدد كثافة الجماعة الميكروبية، بينما نجد أن التفاعلات الإيجابية تحفز وتعزز مقدرة بعض جماعات الأحياء الدقيقة على بقائها حية Survive بوصفه جزءًا من المجتمع في الموطن المحدد (et. al. 2006 Bloem)، وكذلك الحال بالنسبة إلى علاقة الافتراس Predation تُعدّ علاقة سلبية بين جماعات الأحياء الدقيقة، فعملية الافتراس مفيدة للمفترس ومضرة بأنواع الفريسة، وعلى الرغم من ذلك فيُعدّ الافتراس والتطفل طريقين طبيعيين للتحكم في الجماعات وعدم السماح بازدهار جماعة معينة على حساب جماعات أخرى ما يضر بالتوازن البيئي في النظام البيئي، ويعرضه للتهدم والدمار، وإن هاتين العمليتين تنظمان التغذية، ومن دونهما قد تستنزف المصادر الطبيعية للغذاء وفي نفاده هلاك لجماعات النظام البيئي وأفراده بشكل عام.

وتتيح تطورات التفاعلات الإيجابية بين جماعات الأحياء الدقيقة إمكانية الاستفادة من المصادر الطبيعية المتاحة واستغلالها بكفاءة عالية، وكذلك تتيح لها إمكانية استيطان بيئات ومواطن يصعب على هذه الأحياء الدقيقة غزوها والوصول إليها بمفردها، وتساعد علاقة التقايض Mutualism بين جماعات الأحياء الدقيقة على إيجاد ميكروبات ذات خصائص وقدرات تمكنها من استعمار مواطن جديدة، وإن التفاعلات الإيجابية تؤدي إلى توحيد قدرات ونشاطات الأحياء الدقيقة، سواء ما كان منها فيزيائيًّا أو كيميائيًّا أو نشاطًا أيضيًّا بما يجعلها قادرة على النمو بشكل أفضل واستعمار مواطن وبيئات أوسع وبكفاءة أعلى، وإضافة إلى ذلك فإن التفاعلات الإيجابية تجعل جماعات الأحياء الدقيقة أكثر قدرة على الصمود أمام الظروف البيئية القاسية، وتتحملها بشكل أكبر.

وفي المقابل نجد أن التفاعلات السلبية تحدّ من كثافة الجماعة، وتمثل تنظيمًا ذاتيًّا داخل الجماعة يفيد في المحافظة على أنواع الأحياء الدقيقة على المدى البعيد، وتشترك التفاعلات السلبية والإيجابية في بناء المجتمع الحيوي وتحديد معالمه في ظل النظام البيئي المشترك لجميع كائنات البيئة الحية وغير الحية.

ومن الصعوبة بمكان تناول جميع العلاقات السلبية والإيجابية وصورها المتباينة بشكل مفصل، ولكن سوف أتطرق إلى بعضها بشيء من التفصيل قدر الإمكان.

- **الحيادية Neutralism**

يدل مفهوم الحيادية على وجود نقص في التفاعل بين جماعتين من الأحياء الدقيقة أو ارتباط هامشي بين جماعتين مختلفتين، والحقيقة أن الحيادية لا يمكن أن تتم بين مجموعتين متماثلتين في الوظائف والقدرات الفسيولوجية داخل الموطن نفسه، بل إن تفاعل الحيادية يحدث بين جماعتين ميكروبيتين لهما خصائص مختلفة وأنشطة أيضية متباينة وقدرات متنوعة، وتتم الحيادية بين جماعات متباعدة داخل المجتمع الحيوي، ويبدو أنها تتم في ظل الجماعات الميكروبية قليلة الكثافة، ويصل التباعد إلى درجة أن الجماعة لا تحس أو لا تشعر بوجود الجماعة الميكروبية الأخرى.

ولإن الحيادية ليس لها تأثير واضح يمكن دراسته وتشخيصه، فإنه يصعب تحديد درجة التفاعل في مثل هذه الحالات بين جماعات الأحياء الدقيقة، وتكون الحيادية بين الجماعات الميكروبية الموجودة في البيئات البحرية والمواطن الأوليجوتروفية Oligotrophic؛ أي قليلة العناصر الغذائية ما يجعلها قليلة الكثافة إلى حد كبير، وفي التربة والرواسب تنشأ الحيادية بين جماعات الأحياء الدقيقة عندما تشكل مواطن معزولة مصغرة Microhabitats، علمًا أن العزل أو الفصل الفيزيائي وحده لا يضمن أن تتم علاقة الحيادية بين الميكروبات التي تستوطنه، فمثلًا الأحياء الدقيقة الممرضة Pathogenic microorganisms قد تغزو جذور النبات، وتؤدي إلى موت النبات، وتهدم موطن جماعات الأحياء الدقيقة الأخرى في الأوراق، فليس هناك علاقة مباشرة بين الجماعة الميكروبية الغازية في الجذور وتلك الجماعة الأخرى في الأوراق، وعلى الرغم من ذلك فإن الجماعة الممرضة تسببت في تهدم موطن جماعة أخرى بعيدة عنها بطريقة غير مباشرة.

وتحدث علاقة الحيادية بين جماعتين من الأحياء الدقيقة، خصوصًا عندما توجدان كلاهما خارج موطنهما الأصلي، وخير مثال على ذلك وجود جماعات الأحياء الدقيقة في الغلاف الجوي، فمعلوم أن كثافة الأحياء الدقيقة في الغلاف الجوي تكون منخفضة بسبب عدم استقرار الظروف البيئية وتعرضها للإشعاعات؛ لذا تكون الأحياء الدقيقة الموجودة في الغلاف الجوي غير مستوطنة Allochthonous، فتسود علاقة الحيادية بين جماعات الأحياء الدقيقة في الغلاف الجوي، وإضافة إلى ذلك تحدث الحيادية في حال وجود جماعات الأحياء الدقيقة في ظروف بيئية غير مناسبة أو قاسية، مثل أجواء تجمد الأطعمة لحفظها أو أعماق البحار أو المحيطات المتجمدة وغيرها من الظروف والعوامل البيئية Environmental factors غير المواتية التي لا تحفز نمو الأحياء الدقيقة وازدهارها وتكاثرها، وتزيد من كثافة الجماعة الميكروبية، وتبقى الميكروبات محدودة نمو، فتسود علاقة التفاعلات الحيادية في ظل مثل هذه الظروف غير المناسبة للنمو والتكاثر من قِبل الأحياء الدقيقة في أي من المواطن البيئية المتنوعة.

- **التعايش Commensalism**

تنتشر علاقة التعايش بين جماعات الأحياء الدقيقة، وقد اشتق مصطلح التعايش Commensalism من الكلمة اللاتينية Mensa، وفي هذا النوع من العلاقة يحصل أحد الشركاء على منفعة، بينما لا يحصل الطرف الآخر على أي منفعة، ولكنه غالبًا لا يضار من هذه العلاقة، حيث يعيش كائن حي مع آخر مضيف، ويعود النفع كله على الكائن المتعايش، وأما المضيف فلا يستفيد أو يضار، ومن أمثلة المعايشة تلك العلاقة بين بعض الطحالب والنباتات التي تتخذها دعامة تتسلق عليها، وكذلك بين فطر الكمأة Truffles ونبات الأرقة *Helianthemum lippii*، فعلاقة التعايش Commensalism تكون حيادية لجماعة ومفضلة لجماعة أخرى من الأحياء الدقيقة في الموطن البيئي، ويعتمد التعايش على التغيرات الكيميائية أو الفيزيائية للموطن البيئي الذي يُوجَد فيه الكائن الحي، فاستمرار عوامل النمو وإنتاج المواد وتنقلاتها واستبعاد المثبطات وغيرها كثير، كل هذه تؤثر مجتمعة أو منفردة في علاقة الأحياء الدقيقة بعضها ببعض.

فالتعايش علاقة تفاعلية تتم بين جماعتين من الأحياء الدقيقة، بحيث تستفيد جماعة دون الجماعة الأخرى التي لا تتضرر من هذه العلاقة، فالجماعة المستفيدة تحتاج إلى مساندة الجماعة الأخرى خلال أنشطتها؛ لتزيد من قدراتها خلال هذه العلاقة، وهناك عدد من العوامل الفيزيائية والكيميائية المهمة تقوم عليها علاقة التعايش، وإن التفاعلات التعاونية داخل جماعات الأحياء الدقيقة قد تكون مهمة لحدوث التعايش، خصوصًا عندما تستخدم الجماعة مواد غير قابلة للذوبان Insoluble substrate مثل اللجنين أو السليلوز، فإن الأنزيمات الخلوية الخارجية Extracellular enzymes التي تفرزها بعض أفراد الجماعة الميكروبية مثل الفطريات تعمل على تحلل المواد غير القابلة للذوبان، وتجعلها متاحة لجميع أفراد الجماعة، وإن المنتجات الذائبة التي تتحرر بواسطة مثل هذه الأنزيمات يمكن استخدامها من قِبل الجماعة الأولى المستفيدة من علاقة التعايش.

وتحدث علاقة التعايش عندما تكون الجماعة الثانية غير المتأثرة في حالة نمو اعتيادي ونشاط أيضي مناسب، وتهيئ التغيرات في الموطن لنشوء مثل هذه العلاقة الإيجابية بين جماعات الأحياء الدقيقة المتجاورة، فعلى سبيل المثال عندما تنمو الجماعة اللاهوائية الاختيارية Facultative anaerobes في الموطن، وتستخدم الأوكسجين، وتقلل من وجوده، فإنها تُوجِد بذلك موطنًا مناسبًا لنمو الجماعة اللاهوائية الإجبارية Obligate anaerobes، ففي مثل هذا الموطن استفادت الأحياء الدقيقة اللاهوائية الإجبارية من النشاط الأيضي للكائنات اللاهوائية الاختيارية، وفي المقابل لم تتضرر اللاهوائية الاختيارية من هذه العلاقة. إذًا كلتا الجماعتين لم تتضررا بسبب عدم تنافسهما على مصدر محدود مشترك، على الرغم من اقتصار الفائدة على الجماعة الثانية، حيث إن وجود الأحياء الدقيقة اللاهوائية الإجبارية مرتبط بتوافر البيئة المصغرة Microenvironment التي بنيت على علاقة التعايش (Atlas and Bartha 1993).

وإنتاج عوامل النمو Growth factors يشكل القواعد الضرورية لحدوث علاقة التعايش بين جماعات الأحياء الدقيقة، فنشاط بعض الأحياء الدقيقة في الموطن البيئي قد يجعله مهيأ بشكل يناسب جماعة ميكروبية أخرى، فنجد أن بعض الجماعات الميكروبية لديها القدرة على إنتاج الفيتامينات وبعض الأحماض الأمينية التي يمكن أن تستخدمها جماعات ميكروبية أخرى إذا وُجِدت في هذا الموطن، ونمو بعض الأحياء الدقيقة في التربة مرتبط بعوامل النمو التي تفرزها Excrete مجموعة من الأحياء الدقيقة، وكذلك الحال في المواطن والبيئات المائية، فمثلًا وُجِد أن بكتيريا الكبريت Flavobacterium brevis تنتج حمض السستين Cysteine الذي تستخدمه بكتيريا Legionella pneumophila، فطالما أن في المجتمع الحيوي جماعة تفرز عوامل مهمة لنمو جماعة أخرى، فإن هذا يجسد ويعزز من حدوث تفاعل التعايش بين الأحياء الدقيقة في الموطن البيئي الطبيعي.

وإضافة إلى أن تحولات المعادن والمركبات من الصور غير الذائبة إلى الذائبة ومن الصلبة إلى السائلة والغازية بفعل نشاطات الأحياء الدقيقة، وما تفرزه من أنزيمات وأحماض عضوية تُعدّ من أهم العوامل التي تحدث في ظلها علاقة التعايش بين جماعات الكائنات الحية في المواطن البيئية، فمثلًا إفراز الميثان من جماعات بكتيريا الميثان Methanobacterium في الرواسب تستفيد منه الجماعات الميكروبية المؤكسدة للميثان للحصول على الطاقة، وإن نشاط بعض الجماعات الميكروبية يؤدي إلى توفير مركبات ضرورية لجماعات ميكروبية أخرى تعيش في المكان البيئي نفسه.

وهناك جماعات من الأحياء الدقيقة قد يؤدي نشاطها إلى تحويل المركبات العضوية غير الذائبة إلى مركبات بسيطة ذائبة تستفيد منها جماعات ميكروبية أخرى، وتكون سببًا في نموها وازدهارها في الموطن البيئي، فالأنزيمات الخارجية التي تفرزها الفطريات والخمائر تعمل على تفتت وتحلل البقايا والمركبات المعقدة مثل السليلوز واللجنين، وتوفر سكر الجلوكوز الذي تتغذى عليه جماعات هائلة من الأحياء الدقيقة غير ذاتية التغذية Heterotrophic microorganisms، وكذلك ما يشجع على حدوث علاقة التعايش بين جماعات الأحياء الدقيقة، مقدرة بعض الجماعات الميكروبية على تخليص الأوساط البيئية من المركبات السامة والمعادن الثقيلة، إما بتكسيرها أو اتحادها مع مركبات أخرى، فتكون بذلك البيئة مناسبة لنمو جماعات ميكروبية أخرى كانت غير قادرة على النمو فيها من قبل (جبر وآخرون 2001م).

- **التعاون Synergism**

تكون علاقة التعاون بين جماعتين من الأحياء الدقيقة، بحيث تستفيدان كلاهما من هذه العلاقة، علمًا أن هذه العلاقة التعاونية تكون غير إجبارية لأي من الجماعتين وهذا ما يميزها عن علاقة التقايض Mutualism، فكلتا الجماعتين لديهما القدرة على العيش في بيئاتهما الطبيعية، وعلى الرغم من

ذلك، فإن وجود مثل هذه العلاقة التعاونية تعطيهما قدرات تعايش أكبر. وعلاقات التعاون قد تفقد عندما يتم استبدال جماعة بأخرى في المجتمع الحيوي، وفي بعض الحالات يصعب تقدير فائدة إحدى الجماعات، وعندها يأتي سؤال: هل يمكن اعتبار العلاقة تعاونًا أم تعايشًا؟ وإنه في حالات أخرى قد يصعب تقدير العلاقة هل هي إجبارية، فتكون تكافلًا، أم أنها غير إجبارية، فتكون تعاونًا.

علمًا أن علاقة التعاون تتيح لكلتا الجماعتين من الأحياء الدقيقة فرصة القيام بأنشطة حيوية مثل تخليق بعض المنتجات التي يصعب تكوينها لو كانت كل جماعة بمفردها، وكذلك من خلال تفاعل التعاون تستطيع الجماعات الميكروبية بناء مسارات أيضية جديدة مفيدة لكلتيهما، ومن دون هذه العلاقة تكون الأحياء الدقيقة غير قادرة على تحقيقها.

ومصطلح التعاون Synergism يدل على التفاعل بين جماعتين أو أكثر من الأحياء الدقيقة تمد كلٌّ منهما الأخرى بالاحتياجات الغذائية، فالجماعة الأولى مثلًا تكون قادرة على استخدام مركب A لإنتاج مركب B، ولا تستطيع المضي في التفاعلات الحيوية من دون التعاون مع جماعة ميكروبية أخرى إلى أكثر من ذلك؛ لعدم قدرتها على إفراز الأنزيمات اللازمة للتفاعلات الأخرى، والجماعة الثانية غير قادرة على استخدام مركب A، ولكن يمكنها تحويل مركب B الذي أنتجته الجماعة الأولى إلى مركب C؛ لذا فإن كل جماعة من الأحياء الدقيقة في تفاعل التعاون تكون في حاجة إلى جماعة ميكروبية أخرى للتشارك في إتمام مثل هذه التفاعلات من خلال ما لديهما من أنزيمات وأحماض عضوية (Buscot and Varma 2005).

والمثال التقليدي الذي يجسد علاقة التعاون تبينه البكتيريا الكروية Streptococcus faecalis في علاقتها مع بكتيريا القولون Escherichia coli، فكلتاهما غير قادرتين على تحويل الأرجنين Arginine إلى بتريسين Putrescine بمفردهما، فالبكتيريا Streptococcus faecalis قادرة على تحويل Arginine إلى Ornithine، وهذا تستخدمه جماعة Escherichia coli لإنتاج Putrescine، فبكتيريا القولون بمفردها قادرة على استخدم Arginine لإنتاج Agmatine ولكن لا تستطيع إنتاج Putrescine من دون مساعدة البكتيريا ستربتوكوكس.

وتقوم علاقات التعاون باستمرار بين أوساط الأحياء الدقيقة على قدرة جماعة ميكروبية لدعم عوامل النمو لجماعة أخرى، فمثلًا في الوسط الغذائي الفقير بالمغذيات تستطيع أن تعيش سويًّا البكتيريا Lactobacillus arabinosus مع Streptococcus faecalis، ولكنهما في الوقت نفسه تفشلان في العيش بمفردهما في مثل هذه البيئة الفقيرة،

فالبكتيريا Streptococcus faecalis تحتاج إلى حمض الفوليك Folic acid الذي تنتجه *arabinosusLactobacillus*، وفي المقابل تحتاج البكتيريا *Lactobacillus arabinosus* إلى الفينيلين Phenylalanine الذي تفرزه Streptococcus faecalis، فعلاقة التعاون تحقق لهما احتياجات وعوامل نمو لتعيش الجماعتان في موطن بيئي مشترك.

- **التقايض Mutualism**

خلال هذه العلاقة تتبادل بعض جماعات الأحياء الدقيقة المنفعة، إذ تعتمد كل جماعة ميكروبية إجباريًّا Obligate على الجماعة الأخرى في الحصول على نوع من الغذاء دون أن تتضرر إحداهما، وتعرف هذه الطريقة من المعيشة بالتقايض Mutualism أو التكافل (Symbiosis)، وهو أن يتشارك كائنان في تبادل المنفعة بينهما دون أن يلحق بأيهما ضرر، وهناك أمثلة عدة لكائنات حية دقيقة تتبع هذه الطريقة في معيشتها، مثل:

1. الأشنات (Lichens): يتكون جسم الأشنة من فطر وطحلب يعيشان معًا، حيث تتحد فطرة أو أكثر مع طحلب أو أكثر، ويمد الطحلب الفطرة بالمواد الكربوهيدراتية خلال عملية البناء الضوئي التي يقوم بها لاحتوائه على اليخضور، بينما يقوم الفطر بحماية جسم الأشنة وإمداد الطحلب بالماء والمواد الغذائية الأخرى، وباتحاد الاثنين معًا تستطيع الأشنة أن تقاوم ظروف الجفاف القاسية التي تتعرض لها (الشكل 5-1).

الشكل (5-1) أشنات تمثل علاقة تبادل المنفعة (التكافل).

2. الجذر فطريات Mycorrhiza وبكتيريا العقد الجذرية: يوجد نوعان من الجذر فطريات، فإحداهما خارجية (Exotrophic) والأخرى داخلية (Endotrophic) ففي الأولى تغطي الخيوط الفطرية الجذر مكونة غطاءً كاملًا حوله دون أن تخترق أنسجته، ولكن تحل محل الشعيرات الجذرية، وتقوم بعملية الامتصاص، وفي جذر الفطريات الداخلية تعيش بعض الخيوط الفطرية في داخل خلايا القشرة للجذر، وتكون على اتصال بالخيوط الفطرية الموجودة على سطح الجذر، ويتم تبادل المواد الغذائية بين الفطرة والنبات الراقي، وبهذا الاتحاد يستطيع الطرفان مقاومة الظروف القاسية عما لو كانا منفردين.

3. في نباتات العائلة البقولية: يظهر على جذورها عقد بكتيرية (Bacterial nodules) ويمد النبات الراقي البكتيريا العقدية Rhizobium التي تعيش في هذه العقد بالمواد الكربوهيدراتية، وفي

مقابل ذلك تمد البكتيريا النبات بالمواد النيتروجينية (النترات Nitrate) التي تثبتها من النيتروجين الجـوي خلال عملية التآزت Nitrogen fixation (Al-Falih 2002).

- **التنافس Competition**

يحدث التنافس بين الجماعات الميكروبية التي تشغل المكان البيئي نفسه، وتتزاحم عليه، ويُعدّ التنافس Competition تفاعلًا سلبيًّا بين جماعات الأحياء الدقيقة التي تتضرر من جميع الأطراف المتنافسة للحصول الغذاء والنمو والبقاء على قيد الحياة، والتنافس الناجح يؤدي إلى معدلات نمو عالية في حال الظروف البيئية المناسبة، وأما إذا كانت الظروف البيئية غير مناسبة فإن التنافس الناجح هو الذي يساعد الكائن الحي على زيادة قدرته على التحمل Tolerance والبقاء على قيد الحياة، وأما عند استقرار

أو ثبات الظروف البيئية، فإن التنافس عادة ما يؤدي إلى تأسيس الجماعات السائدة وإقصاء Exclusion الجماعات غير الناجحة في التنافس، علمًا أن الإقصاء لا يحدث في الأماكن أو البقع المؤقتة التي تقل فيها تفاعلات التنافس لتوافر المصادر.

وتنوع الظروف البيئية Environmental factors يُوجِد عوامل أو فرصًا تسمح بوجود الجماعات المتنافسة في البيئات الطبيعية، ومبدأ الإقصاء التنافسي Competitive exclusion principle المعروف يشير إلى أن التنافس يميل إلى تحقيق الفصل البيئي للجماعات المتقاربة، والإقصاء التنافسي يحدث بين جماعتين من الأحياء الدقيقة تشغلان المكانة البيئية Niche نفسها، واحدة سوف تكسب التنافس والجماعة الأخرى تحجم وتبعد، وقد تتعاون الجماعات إذا نجحت في تفادي التنافس المباشر فيما بينها، وذلك من خلال استخدام مصادر مختلفة في أوقات مختلفة.

وفي ظل علاقة التنافس قد تصل جماعة من الأحياء الدقيقة إلى مستوى منخفض من الكثافة ومعدلات النمو، على الرغم من أن لديها القدرة على تحقيق معدلات أعلى في حال غياب الجماعة الميكروبية التي تنافسها في ذات الموطن البيئي المشترك بينها، ويحدث التنافس عندما تشترك جماعتان من الأحياء الدقيقة إما في الحيز المكاني

أو تتغذى على مصادر مشتركة محددة، وإن للتنافس آثارًا سلبية في الجماعات الميكروبية من جانب آخر يتمثل في إفراز مثبطات نمو ومواد كيميائية تأتي نتيجة لتزاحم الأحياء الدقيقة وتراكم النشاطات الأيضية في الوسط الغذائي، وسوف أشرح آلية علاقة التنافس الميكروبي من جانب المصادر الغذائية في الموطن البيئي، وممكن أن يحدث التنافس لأي مصدر محدد للنمو Growth-limiting، وقد تتنافس جماعات الأحياء الدقيقة على المصادر المتاحة للكربون، والنيتروجين، والفوسفات، والأوكسجين، وعوامل النمو، والماء، وغير ذلك.

ويمكن ملاحظة مبدأ الإقصاء التنافسي من خلال التجارب التي تستخدم في غرف النمو المعروفة بالكيموستات Chemostats، فتحت الظروف المحدودة تعيش جماعة بكتيرية واحدة في الكيموستات، وتبعد من النظام الجماعات الأخرى المتنافسة على المصادر الأولية، والجماعة التي تملك معدلًا عاليًا من الصفات والخصاص الحقيقية هي التي تبقى حية، والجماعات الميكروبية ذات المعدلات المنخفضة من النمو والقدرات تبقى خامدة وتضمحل، وتختلف معدلات النمو والصفات والخصائص للأحياء الدقيقة المتنافسة تحت الظروف البيئية التي تعيش فيها، وهذا يشرح تعاون الجماعات في الموطن نفسه على الرغم من تنافسها على الغذاء نفسه، فمثلًا في البيئة البحرية يُلاحَظ أن جماعات البكتيريا المحبة للبرودة Psychrophilic والبكتيريا Psychrotrophic تعيشان مع بعض على الرغم من أنهما يتنافسان على المغذيات العضوية منخفضة التركيز نفسها، وتشير الدراسات إلى أنه في حال الظروف البيئية المتغيرة يُلاحَظ أن بكتيريا الكبريت تتعاون مع جماعة أخرى من الأحياء الدقيقة المنافسة لها على المواد نفسها في الموطن نفسه.

وإن الدراسات البيئية الكثيرة التي أجريت على الطحالب دعمت نظرية التنافس القائم على المضادة الغذائية، فتمت ملاحظة الحصيلة الممكنة للتنافس البيئي المتضمن للتعاون الثابت، وذلك في أثناء دراسة مخبرية على نوعين من دياتومات المياه العذبة هما: *Asterionella formosa* و*Cyclotella meneghiniana* وكان الفوسفات والسيليكا محددين لوجودهما، وقُدِّرت نتيجة التنافس بين الطحلبين من خلال وفرة هذين العنصرين أو غيابهما، وقد حدث التعاون عندما كان معدل النمو لكلا النوعين محددًا بمصادر غذائية متنوعة، ويحدث التنافس الإبعادي *Competitive displacement* إذا كان واحد فقط من المغذيات هو المحدد، فالجماعة القادرة على استخدام العنصر المحدد بشكل أفضل تبعد أو تقصي الجماعة الأخرى من الأحياء الدقيقة، ووُجِد في هذه الدراسة التي أجريت على نوعين من الطحالب أنه إذا كان كلا النوعين نموهما محددًا بالفوسفات، فإن الطحلب *Asterionella formosa* يبعد الطحلب *Cyclotella meneghiniana*، وفي الظروف التي تكون السيليكا Silicate محددة للنمو فإن الدياتوم *Cyclotella meneghiniana* يبعد الطحلب *Asterionella formosa*.

ويمثل تطور جماعات السيادة من الأحياء الدقيقة حالة من الإبعاد التنافسي داخل المجتمع البيئي الحيوي، ومن الجدير بالذكر أن المكونات غير الحية Abiotic parameters مثل درجة الحرارة، ودرجة الحموضة pH، وتركيز الأوكسجين تؤثر بشكل كبير في معدلات النمو الحقيقي Intrinsic growth rates للجماعات الميكروبية ونتيجة التنافس بينها، فوجود مواد بتركيزات عالية يؤدي إلى إبعاد بكتيريا البحار اللولبية Spirillum نتيجة للتنافس مع بكتيريا القولون Escherichia coli، وفي التركيزات المنخفضة يحدث العكس، وتبعد بكتيريا القولون، وسيادة الجماعات الميكروبية في الصرف الصحي الذي يحتوي على مواد عضوية بتركيزات عالية يجعل الجماعات الأصلية Autochthonous populations تستبعد الأحياء الدقيقة غير المستوطنة التي تقدم عند

المصب الرئيس أو عند جوانب المجرى وأطرافه (Adair et. al. 1999, Board 1983, Adams & Moss 1995).

- **التضاد Amensalism**

يُعدّ التضاد Amensalism (Antagonism) علاقة تفاعلية سلبية Negative relationship لجميع الأطراف، وهذه تنتشر بين جماعات الأحياء الدقيقة خصوصًا ذات الكثافة العالية، وإن الكائن الحي الذي ينتج بشكل طبيعي مواد سامة لمنافسة جماعات من الأحياء الدقيقة يُعدّ مستفيدًا من العلاقة التنافسية، وعندما تفرز جماعة ميكروبية مادة تكون مثبطة لنمو جماعات أخرى من الأحياء الدقيقة فإن العلاقة المتداخلة بينهما تسمى تضادًّا، والجماعة الأولى قد لا تتأثر بهذه المادة بل قد تستفيد منها بوصفها وسيلة ناجحة في التنافس مع الجماعات الأخرى، وقد استُخدم مصطلح التضادية Antibiosis

أو Allelopathy للتعبير عن مثل هذه الحالات للتثبيط الكيميائي.

وهناك حالات من التضاد المعقد بين جماعات من الأحياء الدقيقة في الطبيعة، مثل ما يعرف باسم مبيد الفيروسات Virucidal وهو قاتل للفيروسات في مياه البحر، وكذلك مضاد الفطريات Fungistasis في التربة، فالعلاقة التفاعلية بين الجماعات الميكروبية التي لدى بعضها القدرة على إفراز مثل هذه المواد الكيميائية المثبطة تدخل ضمن التضاد الميكروبي، على الرغم من أن التعقيم يزيل عوامل التثبيط الميكروبية، ولكن يبقى أثر المثبطات الكيميائية المنتجة في الوسط البيئي.

وقد يقود التضاد إلى أولوية استعمار الموطن البيئي، فعندما يستوطن الكائن الحي موطنًا من المواطن، ويتكيف معه، ويتأقلم مع ما فيه من مكونات يكون قادرًا على منع جماعات ميكروبية أخرى من غزو هذا الموطن والعيش فيه، وإن إنتاج حمض اللاكتيك أو أي أحماض دهنية مماثلة منخفضة الوزن الجزيئي كلها تُعدّ مثبطات لنمو عدد من الجماعات البكتيرية، فعلى سبيل المثال نجد أن الجماعات البكتيرية القادرة على إفراز وتحمل تركيزات عالية من حمض اللاكتيك تكون مؤهلة لتغيير الموطن البيئي وإبعاد الجماعات البكتيرية الأخرى، وقد وُجِد أن بكتيريا القولون Escherichia coli غير قادرة على العيش في الجزء الأول من معدة الحيوانات المجترة Rumen وربما يعود السبب إلى عدم مقدرتها على تحمل الأحماض الدهنية الطيارة التي تفرزها جماعات الأحياء الدقيقة غير ذاتية التغذية اللاهوائية Anaerobic heterotrophic microbial populations، وإن الأحماض الدهنية على سطح الجلد التي تفرزها الأحياء الدقيقة يعتقد أنها السبب في منع نمو مستعمرات لجماعات ميكروبية عدة.

وتعمل بكتيريا الكبريت *Thiobacillus thiooxidans* على أكسدة الكبريت وإنتاج حمض الكبريت Sulfuric acid، وفي البيئات المائية تؤدي هذه العملية إلى خفض قيمة الحموضة pH

إلى درجة أو درجتين، وهذا بدوره يعمل على إبعاد معظم جماعات الأحياء الدقيقة من هذا الموطن، وكذلك وُجد أن استهلاك أو إنتاج الأوكسجين يعمل على إبعاد بعض الجماعات الميكروبية في هذا الموطن البيئي أو ذاك، فإنتاج الأوكسجين بواسطة الطحالب يبعد الأحياء الدقيقة اللاهوائية الإجبارية، ويمنع نموها، بإضافة إلى أن إنتاج بعض الجماعات الميكروبية للأمونيوم Ammonium يكون سببًا في إبعاد عدد من جماعات الأحياء الدقيقة من الموطن أو الوسط البيئي المشبع بالأمونيوم.

وتنتج بعض الجماعات الميكروبية الكحول، والكحولات منخفضة الوزن الجزيئي مثل الإيثانول معروف أنها مثبطة لنمو عدد من جماعات الأحياء الدقيقة؛ لذا فإن الجماعة الميكروبية القادرة على إنتاج الإيثانول تعتمد عليه في إبعاد الجماعات المنافسة في الموطن خلال عملية التضاد، وهذه الوسائل تُعدّ من طرق الحماية والدفاع التي تمكن جماعة من الجماعات من غزو بيئة معينة واستيطانها ثم السيادة التامة بعد أن تنجح في إقصاء كثير من الجماعات الميكروبية المنافسة (الوهيبي 2008م).

ومن أبرز وأهم طرق ووسائل التضاد بين جماعات الأحياء الدقيقة ما يعرف بالمضادات الحيوية Antibiotics، فهي نواتج أيضية ثانوية تفرزها بعض الأحياء الدقيقة، وتقتل أو تثبط كثيرًا من الكائنات الحية الأخرى، حتى وإن كانت بتركيزات منخفضة، وفي الوقت الحاضر تم تصنيع مئات الأنواع من المضادات الحيوية، واستخدمت على نطاق واسع في مجال الصحة، حيث ثبت فاعلية هذه المضادات الحيوية في مقاومة كثير من الأمراض والأوبئة الفتاكة التي تهدد حياة الإنسان.

- **الافتراس Predation**

الافتراس بمفهومه السائد هو أن كائنًا حيًّا يسمى المفترس Predator يبتلع كائنًا حيًّا آخر، ويهضمه وهذا الأخير يسمى الفريسة Prey، وليس هناك حد فاصل بين الافتراس والتطفل، فمثلًا التفاعل بين البكتيريا Bdellovibrio والبكتيريا الحساسة السالبة لصبغة جرام Gram-negative bacteria، فإن بعض الباحثين يَعدّه افتراسًا، وهناك من يَعدّه تطفلًا، وعملية الافتراس مفيدة لجماعة المفترس ومضرة بأنواع الفريسة، وعلى الرغم من ذلك يُعدّ الافتراس والتطفل طريقين طبيعيين للتحكم في انتشار وتوزع جماعات الأحياء الدقيقة، وعدم السماح بازدهار جماعة معينة على حساب جماعات أخرى ما يسبب خللًا في التوازن البيئي لهذا النظام البيئي أو ذاك، إضافة إلى أن علاقة الافتراس والتطفل تنظم التغذية في الأوساط البيئية المتنوعة، فمن دونها قد تُستنزَف المصادر الطبيعية للغذاء وفي نفاده هلاك لجماعات النظام البيئي وأفراده بشكل عام.

والأساس النظري للافتراس يقوم على أن الجماعة الميكروبية المفترسة Predator microbial population والجماعة الميكروبية الفريسة Prey microbial population تكونان سويًّا في دورة تذبذبية متواصلة، فكلما زادت كثافة الأنواع في المجموعتين زادت عملية الافتراس والعكس

صحيح، فهناك نسبة وتناسب واضح بين الجماعة الميكروبية والفريسة، وتقل علاقة الافتراس إلى حد كبير جدًّا في ظل الجماعات قليلة الكثافة متباعدة الأنواع في الموطن الحيوي.

ويُلاحَظ أن علاقة الافتراس بين حماعات الأحياء الدقيقة تعمل على تحطيم الأنواع الفردية وإبعادها، والجماعة الميكروبية الفريسة بشكل عام ممكن أن تستفيد من تسارع دورة المغذيات في النظام البيئي، حيث وُجِد أن زيادة معدلات النمو للفيتوبلانكتون Phytoplankton نتيجة إعادة إنتاج النيتروجين بواسطة المفترسات الحيوانية العالقة في الماء Zooplankton، تعوض بالكامل موت الفيتوبلانكتون المفردة التي تسبب في هلاكها العوالق الحيوانية، ووُجِد أيضًا أن جزيئات حبيبات الطين في التربة توفر حماية ميكانيكية للبكتيريا الفريسة من الجماعات المفترسة، فالطين الخام يوفر فصلًا فيزيائيًّا بين المفترس والفريسة، وهذا يخفض معدل ابتلاع بكتيريا القولون Escherichia coli من قِبل Vexillifera.

- **التطفل Parasitism**

وهو أن يعتمد كائن حي (الطفيل) في الحصول على غذائه على كائن حي آخر (العائل) مسببًا له ضررًا، فالتطفل هو علاقة سلبية بين كائنين مختلفين يستفيد -خلالها- أحدهما، ويتضرر الكائن الحي الآخر، فهي طريقة من المعيشة يكون فيها أحد الكائنات الحية متطفلًا على الآخر، ويعرف الأول باسم الطفيل (Parasite) والثاني باسم العائل (Host) ويستفيد الطفيل من العائل بما ينتج منه من مواد غذائية، بينما يلحق الضرر بالعائل.

وهناك أمثلة عدة للتطفل، منها جميع الأنواع البكتيرية الممرضة Pathogenic bacteria، والميكوبلازما والريكتسيا التي تسبب أمراضًا للإنسان، والنباتات، والحيوانات، مثل مرض ذات الرئة Pneumonia الذي تسببه في كثير من الحالات بكتيريا ديبلوكوكس *Diplococcus pneumoniae* إلا أنه في بعض الحالات قد ينجم المرض عن بكتيريا ليجيونيلا *Logionella pneumophila* والسل الرئوي (التدرن) Tuberculosis وهو عبارة عن مرض معدٍ صدري خطير تسببه بكتيريا ميكوباكتيريوم *Mycobacterium tuberculosis* والسيلان Gonorrhoea، وهو من الأمراض التناسلية الناجمة عن الإصابة ببكتيريا نيسيريا *Neisseria gonorrhoeae* والدفتريا (الخناق) Diphtheria وهو من أخطر أمراض الطفولة التي تنتقل بالعدوى بفعل الرذاذ أو الإفرازات المخاطية للمريض، وتسببه البكتيريا كورينباكتيريوم *Corynebacterium diphtheriae* والحمى المالطية Brucellosis وتسببه بكتيريا بروسيلا Brucella abortus والكزاز Tetanus وهو مرض خطير للإنسان تسببه بكتيريا *Clostriduim tetani*.

وتسبب البكتيريا المتطفلة أمراضًا مختلفة للحيوانات، منها مرض الجمرة الخبيثة Anthrax لدى الأغنام والأبقار الناجم عن الإصابة ببكتيريا *Bacillus anthracis*، ومرض الحمى المالطية لدى

الأبقار والماعز الناجم عن الإصابة ببكتيريا البروسيلا Brucella، ومرض اسوداد سيقان البقر الناجم عن بكتيريا *Clostridium chanvei*، وتسبب البكتيريا للنباتات أيضًا بعض الأمراض مثل مرض قرحة الليمون Citrus canker الناجم عن الإصابة ببكتيريا زانتوموناس *Xanthomonas citri*، وهناك أيضًا مرض شحوب أوراق نبات الأرز الناجم عن الإصابة ببكتيريا *Xanthomonas oryzae*.

إضافة إلى ذلك هناك بعض الفطريات المتطفلة على النباتات، والحيوانات، والإنسان التي تسبب أمراضًا جلدية وباطنية والتهابات في المجاري التنفسية، مثل فطر سابروليجنيا *Saprolegnia* الذي يعيش في الماء، ويتطفل على الطحالب، والنباتات، والأسماك، وفطر فيتوفثورا إنفستانس *Phytophthora infestans* الذي يسبب مرض اللفحة المتأخرة للبطاطا، وفطر بلازموبارا فيتيكولا *Plasmopara viticula* الذي يسبب مرض البياض الزغبي على أوراق العنب، وفطر البوجو كانديدا Albugo candida الذي يسبب مرض الصدأ الأبيض لعائلة النباتات الصليبية (Landecker 1982).

- **المضادات الميكروبيولوجية Antimicrobial agents**

إن المواد المضادة لنشاط ونمو الكائنات الحية الدقيقة هي عبارة عن مواد كيميائية طبيعية أو منتجات صناعية تقتل أو تثبط نمو ونشاط الكائنات الحية الدقيقة، فالمواد الطبيعية يتم إنتاجها بواسطة كثير من الأحياء الدقيقة، وتكون ذات قوة مضادة للكائنات الحية الدقيقة، وتسمى المضادات الحيوية Antibiotics، وأما المنتجات الصناعية ذات القوة المضادة للكائنات الحية الدقيقة فتسمى بناءً على تأثيرها، فإذا كانت قاتلة تسمى مبيدات Germicides وإذا كانت مثبطة تسمى Germistatic، وعليه فالمواد الصناعية القاتلة للبكتيريا تعرف باسم Bactericides، ومبيدات الفطريات يطلق عليها Fungicides، ومبيدات الطحالب تسمى Algicides، بينما تسمى مثبطات البكتيريا Bacteriostatic، وتسمى مثبطات الفطريات Fungistatic، ومثبطات الطحالب تعرف باسم Algistatic.

المضادات الحيوية Antibiotics

المضادات الحيوية هي مواد كيميائية تنتجها الأحياء الدقيقة، وتكون ذات قوة مضادة لكائنات حية أخرى، فتقتلها أو تثبط نموها بدرجة كبيرة ما يحد من انتشارها وسرعة تكاثرها وإيقاف نشاطها، ويُعدّ البنسلين Penicillin أول مضاد حيوي تم اكتشافه مصادفة بواسطة العالم الإسكتلندي فلمنج في أثناء دراسته على الفطر Penicillium sp.. وكان ذلك في عام 1929م وتم إنتاجه على نطاق تجاري لمعالجة الجنود من عدد من الأمراض البكتيرية خلال الحرب العالمية الثانية، ثم توالت جهود العلماء بعد ذلك، وتم اكتشاف الآلاف من المضادات الحيوية.

ويتم إنتاج المضادات الحيوية بواسطة عدد من الأحياء الدقيقة، خصوصًا بعض أنواع البكتيريا والفطريات المنتشرة في التربة، ومن أهمها البكتيريا الخيطية الأكتينوميسيتات Actinomycetes التابعة لجنس Streptomyces، حيث تم استخلاص عدد من المضادات الحيوية من هذه البكتيريا مثل الأستربتوميسين Streptomycin والتتراسيكلين Tetracycline والكلورامفينكول Chloramiphinicol والإرثروميسين Erythromycin، وهناك الباستراسين Bacitracin والبوليمكسين Polymyxin اللذان تم إنتاجهما من البكتيريا العصوية Bacillus.

والمضادات الحيوية تختلف في تأثيرها في الكائنات الحية الدقيقة، حيث يُلاحَظ التخصص في فاعلية بعضها على أنواع ومجاميع معينة دون الأخرى، فبعض المضادات الحيوية تؤثر في الكائنات الحية الدقيقة بدائية النواة، وبعضها الآخر يؤثر في حقيقية النواة دون غيرها من الأحياء الدقيقة.

وإن بعض المضادات الحيوية تؤثر في البكتيريا السالبة لصبغة جرام، بينما نجد أن بعضها تأثيره يكون في البكتيريا الموجبة لصبغة جرام، علمًا أن هناك مضادات حيوية تسمى Broad spectrum antibiotics وهي التي تكون ذات مدى واسع في تأثيرها في الكائنات الحية المتنوعة (Klotz et. al. 2007, Lederberg 1992).

- **مبيدات الأحياء الدقيقة Germicides**

إن مبيدات الكائنات الحية الدقيقة تشمل عددًا من المواد السامة Toxic materials بالنسبة إلى الكائنات الحية الدقيقة، ويطلق عليها أيضًا اسم المطهرات Disinfectants، وقد تتسبب هذه المواد في موت الكائنات الحية الدقيقة، أو أنها تثبط نموها دون أن تقتلها، وتعود الأحياء الدقيقة إلى النمو بعد إزالة آثار المادة السامة، وتم استخدام هذه المواد على نطاق واسع في المستشفيات والمختبرات ومياه الشرب وفي صناعة الأدوية والصناعات الغذائية ومياه الصرف الصحي قبل ضخها في البيئة؛ وذلك لتقليل التلوث الميكروبي وخطورته قدر الإمكان، ومن هذه المواد الهالوجينات (كالكلور، واليود) التي تعمل على أكسدة وتخريب المواد العضوية البنيوية في الخلية البكتيرية، ومركبات السلفا التي تتداخل مع الأنزيمات الخاصة بعملية التنفس ونقل الطاقة بالخلية، إضافة إلى الكحولات والمعادن الثقيلة والمعقمات الغازية التي تعمل على تغيير طبيعة الأنزيمات والبروتينات والأحماض النووية بالخلية، وإن هناك الصابون والمنظفات الصناعية التي تعمل على اختزال التوتر على سطح الخلايا الميكروبية، ومن ثم تثبط النمو دون أن تقتل الكائن الحي، فلا تعني المعاملة بمبيدات الأحياء الدقيقة تمام التعقيم، ولكن يتم من خلالها قتل معظم البكتيريا الممرضة Pathogenic bacteria غير المتجرثمة.

وإن تقسيم المواد المضادة للكائنات الحية الدقيقة إلى مبيدات قاتلة ومثبطات هو في الواقع لا يعدو أن يكون تقسيمًا تقريبيًّا؛ وذلك لأن بعض المواد المثبطة عند تركيز منخفض قد تكون مبيدة عند التركيزات المرتفعة من المادة نفسها، وإنها قد تُقسِّم المواد المبيدة للأحياء الدقيقة Germicides

وفقًا لتأثيرها في الجلد والأغشية المخاطية إلى قسمين: القسم الأول هو مواد مطهرة للجلد Antiseptics، وهذه مواد قاتلة للكائنات الحية الدقيقة ومأمونة الاستعمال تستخدم لتطهير الجلد والجروح والأغشية المخاطية، والقسم الثاني من المبيدات للأحياء الدقيقة هو مواد مطهرة للأسطح Disinfectants تقتل الكائنات الحية الدقيقة، لكنها ليست مأمونة الاستعمال مع الجلد أو الجروح أو الأنسجة الحية؛ لذا تستخدم فقط لتعقيم الأسطح، والأرضيات، والأطباق.

المقاومة البيولوجية Biological antagonism

المقاومة البيولوجية تعني محاولة القضاء على كائن حي معين بواسطة كائن حي آخر يفترس الكائن الأول دون أن يضر بالكائنات الأخرى، وأبرز مثال على ذلك استخدام الإنسان عددًا من الكائنات الحية الدقيقة لتثبيط نمو أو قتل كائنات حية أخرى، فبدراسة المقاومة البيولوجية لبكتيريا العفن البني التي تعيش في التربة Ralstonia solanacearum وُجِد أنها ذات قدرة على التضاد مع بكتيريا العفن البني fluorescent Pseudomonads، وكذلك البكتيريا Streptomyces greases المعزولة من التربة المحيطة بدرنات البطاطس.

وتم إجراء عدد من الدراسات والأبحاث في هذا المجال في عدد من دول العالم وفي مراكز الأبحاث المتخصصة، أدت إلى إيجاد تطبيقات زراعية وصناعية على عدد كبير من الكائنات الحية الدقيقة، وهذا يقود الباحثين إلى توظيف هذه الخاصية لدى بعض الأنواع من الكائنات الحية الدقيقة؛ بغية إكثارها، وخصوصًا الأنواع المفيدة المرغوب فيها، وفي المقابل محاربة الكائنات الحية الدقيقة الضارة أو الحد من خطورتها من خلال استغلالهم عملية المقاومة البيولوجية على نطاق واسع وفي مجالات تطبيقية مفيدة للبشرية.

ومن الجدير بالذكر أن لكل كائن حي في أي نظام بيئي عددًا من الأحياء -في وسطه المحيط- التي يؤثر فيها أو يتأثر بها سلبًا أو إيجابًا، ووجودها في الطبيعة بوصفها أعداء أو منافسين على مصادر غذائية في البيئة المحيطة التي يُوجَد فيها أي كائن حي من الكائنات الحية الدقيقة؛ لذلك تكون سيادة نوع معين على حساب عدد من الأنواع يعود إلى ما لديه من خصائص وما يتمتع به من قدرات ومزايا تركيبية تجعله يؤثر في غيره من الكائنات الحية ذات الاحتياجات الغذائية نفسها، ويبعدها من خلال عملية المقاومة البيولوجية، وساعد علم الوراثة من خلال الطفرات المتنوعة في الكائنات الحية الدقيقة على إثراء هذا الميدان (Kumar & Anand 1998, O’Toole & Kolter1998a, Panuccio et. al. 2009, Lackner & Hertweck 2011).

الفصل السادس

التفاعلات بين الأحياء الدقيقة والنباتات

Interactions among Microorganisms and Plants

- التفاعلات بين الأحياء الدقيقة والنباتات.
- التفاعل مع جذور النبات.
- تثبيت النيتروجين الجوي تكافليّاً

الفصل السادس

التفاعلات بين الأحياء الدقيقة والنباتات

Interactions among Microorganisms and Plants

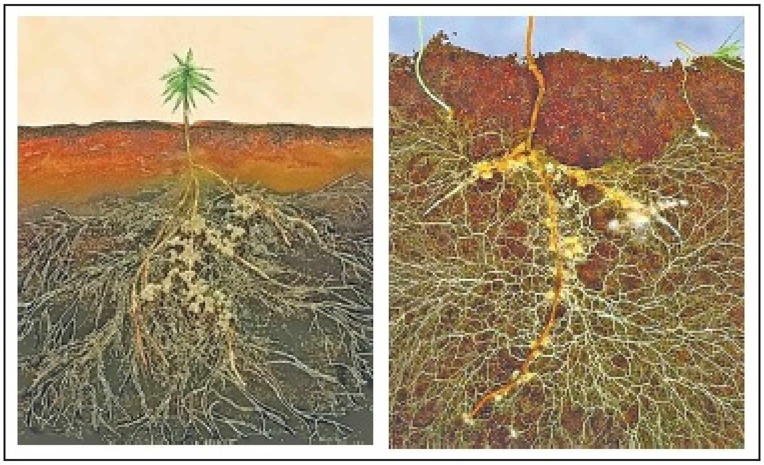
لقد لاحظ الإنسان منذ القدم وجود علاقات وتفاعلات مشتركة بين الأحياء الدقيقة من بكتيريا وفطريات وغيرها من جهة وبينها وبين النبات من جهة أخرى، وهذه التفاعلات منها ما هو مخفي تحت التربة في المحيط الجذري، ومنها ما هو بارز في المجموع الخضري متمثلًا في الأمراض التي تصيب النبات، وتعيق نموه، وفي العصر الحاضر ركزت الأبحاث والدراسات على العوامل الأحيائية وظروف نمو النبات في الطبيعة، وما يحيط بعضو النبات الرئيس (المجموع الجذري Root system) من كائنات حية دقيقة ومتغيرات ودراستها ومن ثم محاولة التحكم فيها وتطويرها لزيادة إنتاجية النبات النامي في الطبيعة وبطرق الاستخدام الزراعي السائد في الأراضي الزراعية، ومثل هذه الدراسات الحقلية التطبيقية أسهمت في رفع كفاءة المحاصيل الزراعية المختلفة بما يعود بالنفع الاقتصادي والغذائي على الإنسان، فركز الباحثون على دراسة قدرة بكتيريا الجذور Rhizobacteria المنشطة لنمو النبات وتحسين معدل النمو وزيادة إنتاجيته عن طريق تخفيض أعداد الكائنات الحية الدقيقة الضارة أو الممرضة Pathogenic microorganisms في المحيط الجذري الذي يزخر بأنواع عدة من الأحياء الدقيقة (et. al. 2007 Aslantas)، ويتأثر نمو النبات في التربة الزراعية بكثير من العوامل الفيزيائية والأحيائية المختلفة، ومحاولة الإنسان مستمرة على مر العصور لتحسين إنتاجية المحاصيل الزراعية بطرق تقليدية قديمة كالتسميد، ومقاومة الآفات الزراعية، وتربية النبات، ومع تقدم المعرفة البشرية استمرت المحاولة في ذلك، ولكن بطرق حديثة ومتنوعة مثل الهندسة الوراثية أو التحكم وتغيير العوامل البيئية المحيطة بالنبات من إضاءة ورطوبة نسبية ودرجة حرارة وتركيز ثاني أكسيد الكربون وغيرها في البيوت المحمية.

ويُعدّ المحيط الجذري للنبات مرتعًا خصبًا لنمو بعض الكائنات الحية الدقيقة، وذلك لتوافر المواد المغذية، حيث يفقد النبات نحو 40% من المواد المتكونة في عملية البناء الضوئي عن طريق الجذور (Lynch and Whipps, 1991)، وفي دراسة أخرى ذكر أن صافي الكربون المفرز عن طريق الجذور من 5 إلى 10% من صافي الكربون المثبت بواسطة النبات (Farrar, et al., 2003).إضافة إلى الكربون تفرز الجذور مختلف المركبات الرئيسة الموجودة عادة في الخلية وأبرزها المواد المخاطية والأحماض العضوية والفينولات وغيرها من المركبات (Morgan, et.al., 2005)، وتشمل الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في منطقة المحيط الجذري كلًّا من البكتيريا التي قد يصل عددها إلى 10 10 خلية/ جم من التربة والفطريات الممرضة وغير الممرضة للنبات وبعض الحيوانات الأولية والحشرات، ومن بين المجاميع البكتيرية التي تعرف عليها العلماء، وعزلوها من منطقة المحيط الجذري مجموعة بكتيريا الجذور المنشطة لنمو النبات

Plant Growth – Promoting Rhizobacteria وهي تقوم بعملية تنشط لنمو النبات وتعيش مع بقية الأحياء الدقيقة في بيئة تنافسية، (Kloepper, 2003) وتشمل آلية تنشيط نمو النبات الزيادة في تثبيت النيتروجين الجوي وإنتاج منظمات النمو والأوكسين والجبريلين والسيتوكاينين والإيثيلين وإذابة الفوسفور وأكسدة الكبريت وزيادة توافر النترات وإنتاج مضادات حيوية إلى خارج الخلية وإنتاج الأنزيمات المحللة وإنتاج حمض الهيدروسيانيد وزيادة نفاذية الجذور (الوهيبي 2008، وسوف أتناول موضوع التفاعلات بين الأحياء الدقيقة والنبات من خلال التفاعل مع جذور النبات وتثبيت النيتروجين الجوي تكافليًا في العقد الجذرية وأمراض النبات التي تسببها الأحياء الدقيقة من فيروسات، وبكتيريا، وفطريات.

التفاعل مع جذور النبات

هناك تفاعلات عدة ومتنوعة تتم بين الأحياء الدقيقة وجذور النباتات الراقية، مثل الفطريات المتكافلة التي تعيش وفق علاقة تبادل المنفعة Symbiotic fungi ومنها الفطريات الجذرية mycorrhiza أو mycorrhizae التي تُوجَد في التربة، وهذه تعيش في المحيط الجذري أو منطقة الجذور Rhizosphere، وتشير الدراسات إلى أن متوسط عرض المحيط الجذري نحو1 مم، وفي بعض الأحيان قد يصل إلى 12 مم بالنسبة إلى نوع واحد من الفطريات مثل فطر Gaeumannomyces gramminis وإن الفطريات الجذرية تؤمّن الفسفور للجذور، ومن ثم تساعد على نموها وانتشارها في التربة، وينعكس ذلك على ازدهار نمو النبات في حين يؤمّن الجذر للفطر الغذاء اللازم (Al-Whaibi 2005) كما في الشكل (6-1).



الشكل (6-1): أنواع من الفطريات الجذرية vasicular-arbuscular mycorrhiza

إن مصطلح mycorrhizae هو مصطلح لاتيني مركب من كلمتين هما: myco التي تعني الفطر وrrhiza التي تعني الجذر، ويعبر عن المصطلح mycorrhizae بالفطريات الجذرية، فهذه الأحياء

الدقيقة تعمل من خلال علاقة تعايشية مع النبات العائل، وتم تصنيف الفطريات الجذرية بحسب نوع النبات العائل وطبيعة الفطر الى أربعة مجاميع رئيسة (et. al. 2005 Barea) وهي:

- Ectomycorrhizae or Sheathing mycorrhizae
- Vasicular – arbuscular (VA) mycorrhizae
- Mycorrhizae of the Ericales
- Mycorrhizae of the Orchidaceae

ويطلق على المجاميع الثلاثة الأخيرة مصطلح Endomycorrhizae أي الفطريات الجذرية الداخلية، حيث إنها تعيش داخل جذور النباتات، وكذلك يطلق مصطلح

الـ Ectomycorrhiza على الأنواع التي تظهر فيها صفات الأكتومايكورايزا، وكذلك الفطريات الجذرية الداخلية معًا Ectomycorrhizae and Endomycorrhizae، فالأكتومايكورايزا تُوجَد بشكل رئيس خارج وحول المناطق الجذرية لأشجار المناطق المعتدلة وفي الأنواع التابعة للفصيلة الصنوبرية Pinaceae ومن أشهر أجناسها الصنوبر، والتنوب، والشوكران، والأرز، وكذلك في عدد من الأنواع التابعة للمناطق شبه الاستوائية مثل أشجار اليوكالبتوس (الكافور)، وإن أكثر الفطريات المسببة لهذا النوع تعود إلى مجموعة الفطريات البازيدية Basidiomycetes التي تتميز بقدرتها على تكوين أجسام ثمرية تشبه المشروم أو عش الغراب.

وإن الفطريات الجذرية يمكن أن تبني علاقات تعايشية مع عدد واسع من النباتات المهمة اقتصاديًّا، مثل محاصيل الحبوب، والبقوليات، ومعظم أشجار الفاكهة، وكذلك نباتات الشاي، والقهوة، والمطاط، وغيرها. وعندما تتكون الخيوط الفطرية تبدأ باختراق قشرة الجذر للنبات العائل، فتكوِّن ما يسمى الـ arbuscel داخل خلايا الجذر، وظيفتها توصيل العناصر الغذائية من خارج الجذر إلى داخل خلايا الجذر، وكذلك تكوِّن ما يسمى الحويصلات vesicel داخل أو خارج خلايا الجذر، وهذه مهمتها خزن العناصر الغذائية الزائدة الممتصة من قِبل الخيوط الفطرية واستخدامها عند الحاجة.

وتحدث الإصابة بالفطر بحسب الاعتقاد السائد أن جذور النباتات تفرز مواد أو مركبات تشجع أو تساعد على نمو الخيوط الفطرية، وتجذبها في اتجاه الجذر تمهيدًا لحصول الإصابة، فعند نمو الفطر بالقرب من سطح الجذر يكوِّن خيوطًا فطرية دقيقة ضيقة تدعى الـ infection peg وهذه تسبب ضغطًا على جدار الخلية نحو الداخل، فيصبح الجدار رقيقًا ما يسهل اختراقه من قِبل الخيط الفطري hyphae ويزداد هذا الاختراق بوجود أنزيمات الـ Phenoloxidase، Protease والـ Pectinase التي يُعتقَد أنها تنتج من قِبل الفطريات الجذرية.

وإن للعلاقة التعايشية بين الفطريات الجذرية والنبات فوائد عدة منها:

- ربط دقائق التربة مع بعضها ما يزيد من ثبات التربة وتقليل تأثير عمليات التعرية التي تتعرض لها التربة، سواء كانت تعرية مائية أو هوائية، وحصول الفطر على ما يحتاج إليه من الكربون ومصادر الطاقة الأخرى عن طريق النبات.

- توفير نظام جذري للنبات أكثر كفاءة لامتصاص الماء والعناصر الغذائية، وتعمل الفطريات الجذرية على زيادة جاهزية العناصر الغذائية للنبات من خلال تحللها للمركبات التي تحتوي على هذه العناصر التي تكون غير ذائبة أو قليلة الذوبان مثل الصخر الفوسفاتي والفسفور العضوي والمركبات الأخرى المثبتة للعناصر الغذائية في التربة، إضافة إلى أنها تقوم بنقل العناصر الغذائية من مناطق بعيدة عن الجذر بواسطة الخيوط الفطرية التي تمتد في التربة لتصل إلى ما يقارب مترين بحسب ما تشير إليه بعض المصادر العلمية.

- إن الجذور المصابة بالفطر تكون أكثر مقاومة للأمراض من تلك غير المصابة، وهذا يعود إلى عوامل ميكانيكية وكيميائية، والعوامل الميكانيكية تكون من خلال الغلاف الخارجي من الخيوط الفطرية الذي يكوِّنه الفطر حول الجذر، وأما الكيميائية فتعود الى المضادات الحيوية والأنزيمات التي يفرزها الجذر والتي بدورها تؤثر في الفطريات والأحياء المسببة للأمراض الجذرية مثل Pythium Phytophthora. وإن الجذور المصابة بالفطر تكون أكثر مقاومة للبرودة ولدرجات حرارة التربة المرتفعة وأكثر تحملًا للملوحة والجفاف.

وتختلف استجابة بعض المحاصيل الزراعية مثل القمح، والذرة، والشعير، وفول الصويا، والفاصوليا، وغيرها للتلقيح بالفطريات الجذرية، ولكنها في الغالب تتراوح بين 0.2 إلى 1.5 طن/ الهكتار، وأشارت نتائج البحوث إلى أن استعمال الفطريات الجذرية قد زاد من إنتاج فاكهة الفراولة بنسبة 25%، وإنها أسهمت في خفض استخدام الأسمدة المركبة من النيتروجين، والفسفور، والبوتاسيوم (NPK) بحدود 30% وخفضت من مياه الري إلى الثلث، وزادت من مقاومة الأمراض، وبذا فهي تسهم في انخفاض تكاليف الزراعة والمكافحة.

تثبيت النيتروجين الجوي تكافليًّا في العقد الجذرية

إن وجود الأحياء الدقيقة في التربة والمحيط الجذري بأعداد هائلة يؤدي دورًا مهمًّا وحيويًّا في تغذية النبات، فمن الأدوار التي تقوم بها الأحياء الدقيقة تثبيت النيتروجين من الهواء الجوي وإذابة الفوسفات والعناصر الصغرى غير الذائبة والمثبتة في التربة، إضافة إلى إنتاج مواد منشطة للنمو مثل الهرمونات، والفيتامينات، والأنزيمات في التربة، وتثبيت النيتروجين الجوي يتم بطريقتين: إحداهما غير تكافلية من خلال البكتيريا Azotobacter والثانية تكافلية من خلال بكتيريا العقد الجذرية Rhizobium في جذور فصيلة النباتات البقولية.

وتعرف الكائنات الحية الدقيقة المفيدة بجميع أنواعها بالمخصبات الحيوية Biological Enrichment خصوصًا تلك التي تعمل على تثبيت النيتروجين الجوي خلال عملية التآزت Nitrogen fixation، وبمعنى آخر الكائنات الحية الدقيقة التي لديها القدرة على استخدام النيتروجين الموجود في الجو على هيئة غاز بوصفه مصدرًا للنيتروجين في تغذية النبات من خلال تثبيته في العقد الجذرية Nodules، وفي الوقت نفسه تحتاج إليه هذه الكائنات لبناء وتكوين خلايا جديدة، وكذلك تلك التي لها القدرة على تجهيز النبات ببعض العناصر الغذائية المثبتة في التربة مثل الفسفور، والبوتاسيوم، وبعض العناصر الصغرى كالنحاس، والزنك، وغيرها من خلال تحويلها من حالة غير جاهزة إلى الحالة الجاهزة للنبات، وهذا ما تقوم به الفطريات الجذرية، إضافة إلى فوائد عدة أخرى.

إن الأكتينومايسيتات Actinomycetes مثل جنس Frankia يمكن أن يكوِّن علاقات تعايشية مع بعض النباتات العشبية مثل الجنس Dryas أو شجيرات مثل الجنس Ceanothus أو أشجار خشبية مثل الجنس Alnus والجنس Casuarina، حيث إن هذه النباتات لديها القدرة على تكوين العقد الجذرية، عندما تكون في حالة تعايشية مع الأكتينوميسيتات، ويمكن لبعض مستعمرات البكتيريا الزرقاء أن تشكل حالة تكافلية مع بعض النباتات الحزازية مثل نبات أنثوسيروس Anthoceros والنباتات السرخسية مثل جنس آزولا Azolla ومع جذور بعض النباتات البذرية كنبات السيكاس Cycas، ويمكن لبعض أجناسها (كالنوستوك Nostoc والأنابينا Anabaena) أن تعيش مع بعض الأجناس الفطرية معيشة تكافلية مكونة الأشنات Lichens، فسراخس الأزولا Azola هي نباتات مائية بسيطة يمكن أن تتعايش مع بعض الأنواع البكتيرية الزرقاء Cyanobacteria ومن خلال هذا النظام التعايشي بين هذين الكائنين يتم تثبيت النيتروجين الجوي، وهذه الحالة من التعايش يمكن أن تحدث في حقول الأرز لتوفير عنصر النيتروجين لهذا المحصول.

وإن قدرة الأحياء الدقيقة المثبتة للنيتروجين الجوي تعتمد على إفراز أنزيم النيتروجينيز (Nitrogenase enzyme) الموجود في هذه الكائنات الحية، ومن مميزات هذا الأنزيم أن له القابلية على اختزال غاز النيتروجين (N2) الموجود في الجو إلى أمونيا وتكوين الأحماض الأمينية التي تُعدّ الوحدة الأساسية في بناء البروتين الخلوي، حيث وُجِد من خلال الدراسات والبحوث أن الحامض الأميني (Glutamic acid) هو الحامض الرئيس الذي يتكون من خلال عملية تثبيت النيتروجين الجوي في معظم هذه الكائنات الحية، ولقد بُدِئ بإنتاج الأحياء الدقيقة بوصفها مخصبات حيوية في مختبرات عالمية، وبعد أن أثبتت الميكروبات كفاءتها في زيادة الإنتاجية من خلال تجارب على مستوى البيوت البلاستيكية المحمية Green houses ومستوى الحقل، فقد تحول إنتاجها من تجريبي إلى إنتاج تجاري، وحاليًّا هناك كثير من الشركات العالمية تقوم بإنتاج هذه الأحياء الدقيقة بوصفها مخصبات حيوية بمختلف أنواعها، وهذه المخصبات أو الأحياء الدقيقة تُحمل على مواد مختلفة مثل الأسمدة العضوية المتحللة وبعض معادن الطين والفحم والبذور، ويهدف

إنتاج هذه المخصبات لغرض استخدامها في تجهيز النبات بالمغذيات النباتية من العناصر الغذائية التي يحتاج إليها النبات في دورة حياته.

وتُوجَد بكتيريا العقد الجذرية في التربة، وتقوم بتثبيت النيتروجين الجوي من خلال علاقتها التعايشية مع النباتات البقولية، وفي حال عدم وجود هذه النباتات فإنها تبقى في التربة، ولا يمكنها تثبيت النيتروجين الجوي، بل تحصل على احتياجاتها من هذا العنصر من التربة، فالبكتيريا العقدية تكون متخصصة بالنسبة إلى النباتات البقولية، وإن النبات لديه القدرة على التعايش مع نوع معين من هذه الأحياء التي قد لا تبني علاقات تعايشية مع نبات بقولي آخر وهكذا، وتتكون العقد الجذرية بعد إصابة الجذر بالبكتيريا العقدية المتخصصة، حيث يتكون في بداية الأمر ما يعرف بخيط العدوى Infection thread الذي يحمل بداخله خلايا البكتيريا، وينتشر هذا الخيط بين جذور خلايا النبات العائل، حيث يخترق خلايا الجذر، وتدخل البكتيريا إلى سيتوبلازم خلايا النبات العائل، وتبدأ في الانقسام مكونة العقدة الجذرية التي يتم من خلالها تثبيت النيتروجين الجوي.

وإن العقد الجذرية تختلف من نبات إلى آخر من حيث الشكل والعدد وموقعها على الجذر، وكذلك في كفاءتها في تثبيت النيتروجين، ولأن السلالات الموجودة في التربة تختلف في كفاءتها بالنسبة إلى تثبيت النيتروجين؛ لذلك فإن إضافة السلالات ذات الكفاءة العالية من البكتيريا العقدية المثبتة للنيتروجين بوصفها لقاحًا بكتيريًّا أصبحت ممارسة عامة لضمان عملية تثبيت النيتروجين بشكل أكثر كفاءة، وهناك طرق عدة لتلقيح النباتات البقولية باللقاح البكتيري، مثل استخدام اللقاح على شكل سائل تخلط به التربة أو البذور، واستخدام اللقاح المحمل على حوامل مختلفة منها المواد العضوية المتحللة وغيرها، وإن بعض اللقاحات تكون على شكل بودرة محملة على بعض معادن الطين أو الفحم الناعم تخلط به البذور، ومن الجدير بالذكر أن هناك عوامل بيئية عدة وعوامل حيوية قد تؤثر في عملية التلقيح بالبكتيريا والإصابة بالنسبة إلى النبات وتثبيت النيتروجين ومن هذه العوامل، إضافة إلى عوامل تتعلق بالبكتيريا نفسها والنبات البقولي العائل.

أمراض النبات Plant pathology

أولًا: الفيروسية Viruses

الفيروسات كائنات لا خلوية إجبارية التطفل Obligatory parasite، وتقسم الفيروسات على حسب نوع العائل أو الكائن الحي الذي تتطفل عليه، وتحدث له ضررًا، فهناك الفيروسات البكتيرية Bacteriophages وهي مجموعة الفيروسات التي تتطفل على الخلايا البكتيرية، وتعمل على موتها وتحللها، وتدعى هذه الفيروسات بملتهمات (آكلات) البكتيريا Bacteriophages أو اختصارًا بالفاجات Phages، ويستغل في الوقت الحاضر كثير منها في القضاء على بعض الأمراض البكتيرية التي تُصيب الإنسان أو في تشخيص بعض هذه الأمراض.

لقد تم اكتشاف هذه الفيروسات من قِبل العالم الإنجليزي تورت Twort في العام 1915م والعالم الفرنسي ديريل Herelle’D في العام 1917م، حيث بيّنا أن بعض عينات مياه الصرف الصحي التي تم ترشيحها عبر مرشح خاص للتخلص من البكتيريا، فإن للرشاحة الناتجة قدرة كبيرة على قتل بكتيريا الدوسنتاريا إذا أضيفت منها كميات قليلة إلى المزرعة البكتيرية، ولقد تبيّن أن الرشاحة تحتوي على فيروس آكل (بكتيريوفاج) لبكتيريا الدوسنتاريا، وتبين أيضًا أن كل نوع تقريبًا من البكتيريا الحقيقية يمكن أن يُصاب ببكتيريوفاج محدد؛ أي إن الإصابة نوعية، فكل نوع من أنواع البكتيريوفاج يمكن أن يتطفل على سلالة واحدة لنوع محدد من البكتيريا.

ولقد أجريت معظم الدراسات في هذا المجال (Gunashekaran 2000) على البكتيريوفاجات التي تصيب بكتيريا القولون Escherichia coli وأطلق عليها اسم كوليفاج Coliphages.

وأما الفيروسات النباتية Plant Viruses فلقد كانت أول الفيروسات المكتشفة، وذلك في عام 1892م، وهي فيروس نباتي (فيروس فسيفساء (تبرقش) التبغ = Tobacco Moasaic Virus TMV، ويبدو هذا الفيروس عصوي الشكل، ويتكون ببساطة من شريط حلزوني لمادة نووية (RNA) محاطة بغلاف بروتيني.

ويُعتقَد الآن أن هناك ما يزيد على 800 مرض نباتي ذات منشأ فيروسي، ومن هذه الفيروسات ما يتسبب في خسائر اقتصادية كبيرة في كثير من محاصيل النباتات الاقتصادية كالبطاطا، والخيار، والطماطم، والتبغ، وقصب السكر، والبنجر، والموز، والفاصوليا، مسببة أمراضًا مختلفة لهذه النباتات مثل فسيفساء (تبرقش) التبغ، والتفاف أوراق البطاطا والطماطم، وتورد قمة الموز، وجرب ثمار التفاح، وتجعد قمم البنجر، وفسيفساء (تبرقش) ثمار الخوخ.

وتُعدّ الأمراض الفيروسية بشكل عام سريعة الانتشار، حيث يمكن نقل المرض الفيروسي من نبات مصاب إلى آخر سليم عن طريق دعك أوراق النبات المصاب بالنبات السليم أو عن طريق تطعيم النبات السليم بجزء من النبات المصاب، بينما يتم انتقال المرض الفيروسي في الظروف الطبيعية بواسطة حبوب اللقاح أو بواسطة ديدان التربة التي تهاجم جذور النباتات (كالنيماتودا) أو بواسطة الحشرات التي تُعدّ الناقل الرئيس للفيروس من نبات مريض لآخر سليم، وخاصة تلك الحشرات المزودة بممصات مثل حشرة المن والذباب الأبيض وبعض الحشرات النطاطة (البسيوني، 2001م).

إضافة إلى ذلك هناك عدد قليل من الفيروسات المعروفة التي تُصيب أنواعًا محددة من البكتيريا الزرقاء، والفطريات، والطحالب، والتريديات، وعاريات البذور.

بعض الأمراض الفيروسية

هناك كثير من الأمراض الفيروسية التي تصيب النبات، ومنها ما يصيب الثمار، ومنها ما يصيب الأوراق، والسيقان، والجذور.

وفيما يلي نستعرض بعض الأمراض ذات المنشأ الفيروسي التي تُصيب عددًا من نباتات المحاصيل الزراعية باختلاف أنواعها وبيئاتها التي تنمو فيها:

1. تبرقش البطاطس:

يمثل هذا المرض أحد أشهر الأمراض التي تُصيب نباتات البطاطا، وتحمل الورقة في بداية المرض نقاطًا صفراء تتسع تدريجيًّا، ثم يلتف نصل الورقة تدريجيًّا، الشكل (6-2، أ)، وتكتسب الورقة الملتفة ملمسًا جلديًّا، ويسبب هذا المرض خسائر كبيرة في المحصول، حيث يتناقص حجم وعدد الدرنات التي يتم إنتاجها من كل نبتة.

ويُعزى هذا المرض إلى فيروس البطاطا Potato virus I، وينتقل هذا الفيروس بين النباتات بواسطة الدرنات الحاملة للفيروس، أو بواسطة بعض الحشرات مثل حشرات المن، وخاصة النوع *Myzus persicae*.

2. تبرقش الخيار:

يصيب هذا المرض نباتات الخيار، إضافة إلى نباتات مختلفة كالبطيخ، والباذنجان، والبصل، وتبدو مظاهر المرض على هيئة نقاط صفراء صغيرة على نصل الأوراق الفتية وكذلك على الثمار، الشكل (6-2، ب). ولا تلبث الورقة المصابة أن تنثني نحو الأسفل، وتبدأ بالذبول، ويبدو النبات المصاب قزميًّا.

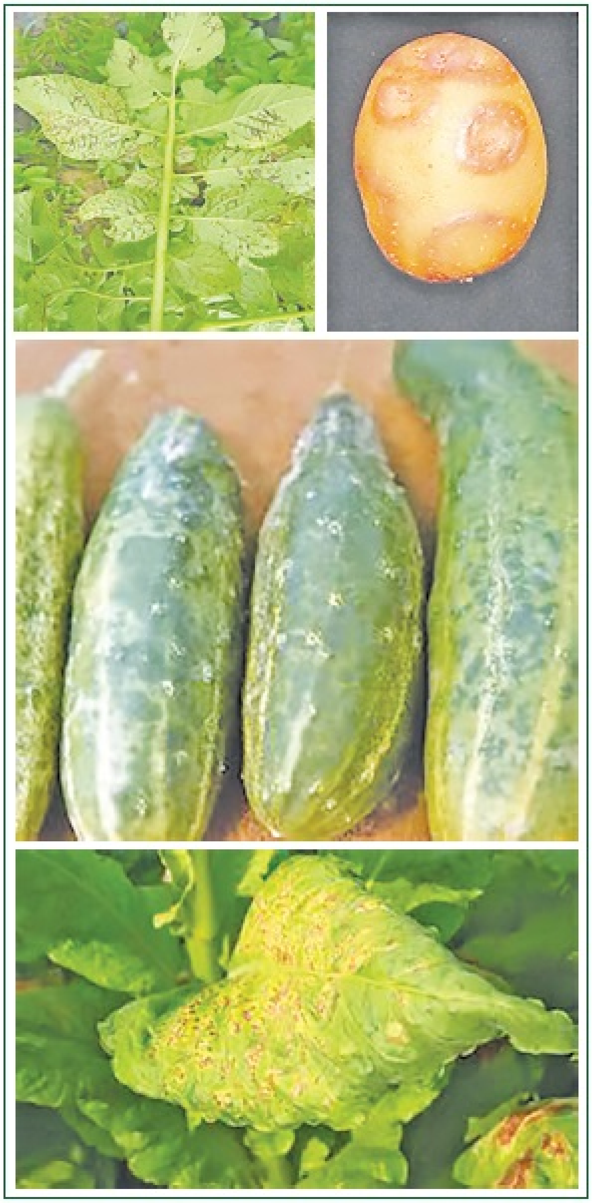
ويُعزى هذا المرض إلى فيروس فسيفساء (تبرقش) الخيار Cucumber Mosaic Virus (CMV)، وهو عبارة عن فيروس مكعب الشكل، يبلغ قطره نحو 30 نانومترًا، وينتقل عن طريق احتكاك النباتات ببعضها أو بواسطة بعض أنواع حشرة المن.

3. تبرقش التبغ:

ينتشر مرض فسيفساء (تبرقش) أوراق التبغ في كثير من بقاع العالم، حيث يزرع نبات التبغ، ويُعدّ من أول الأمراض الفيروسية النباتية المكتشفة ومن أشهرها على الإطلاق، ولقد سمي هذا المرض بهذا الاسم بسبب تَكوُّن مناطق ملونة باللون الأصفر تتخلل المساحات الخضراء الداكنة على الورقة النباتية، الشكل (6-2،ج)، ويُعتقَد أن ذلك يعود إلى تحلل وتخرب صباغ الكلوروفيل Chlorophyll داخل البلاستيدات الخضراء Chloroplasts في المناطق المصابة من الورقة، وقد يعقبه في مرحلة متقدمة من المرض اصفرار كامل الورقة وذبولها، ولا يقتصر هذا المرض

على نباتات التبغ بل إنه يمكن أن يصيب نباتات أخرى كالطماطم، وخاصة تلك المزروعة في البيوت المحمية.

ويُعزى هذا المرض إلى فيروس تبرقش التبغ Tobacco Mosaic Virus (TMV)، وينتقل هذا الفيروس من النباتات المصابة إلى النباتات السليمة بشكل رئيس بواسطة أيدي العاملين في الحقل في أثناء قيامهم بالأعمال الزراعية المختلفة، ويُعدّ فيروس TMV أكثر الفيروسات ثباتًا وتحملًا للظروف القاسية، فهو يمكن أن يبقى في العصير الخلوي مدة قد تزيد على خمسين عامًا.



(أ)
تبرقش البطاطس

(ب)
تبرقش الخيار

(ج)
تبرقش التبغ.

الشكل (6-2) الأمراض الفيروسية لبعض النباتات

ثانيًا: البكتيريا Bacteria

البكتيريا كائنات مجهرية، خلاياها بدائية النوى Prokaryotes، بمعنى أن النواة ليست حقيقية بل هناك كتلة نووية غير مغلفة بغشاء نووي، وتُحاط الخلايا بجدار خلوي غير سليلوزي يتكون بشكل رئيسـ من مجموعة أحماض أمينية وسكريات أمينية منها حمض الميوراميك Muramic acid، ومما يجدر ذكره في هذا السياق أن حمض الميوراميك يُعدّ مميزًا لجدر خلايا كائنات مملكة البدائيات (مونيرا) دون غيرها من الكائنات الحية، ولا يحتوي سيتوبلازم هذه الكائنات عضيات خلوية محددة بأغشية حيوية، فلا توجد بلاستيدات، ولا ميتوكوندريا، ولا أجسام جولجي، ولا شبكة بلازمية داخلية، وتكون الرايبوزومات متناثرة ضمن السيتوبلازم.

وإن البكتيريا وحيدة خلية، لكنها قد توجد في تجمعات مع بعضها، وهي إما ساكنة أو متحركة بواسطة الأسواط، ويتصل بالخلية في هذه الحالة سوط واحد أو أكثر، إلا أن بنية السوط تختلف كثيرًا عن بنية السوط لدى الكائنات حقيقيات النوى Eukaryotes.

وتتعدد وتتنوع طرق التغذية عند البكتيريا، فمعظم أنواعها هي كائنات غير ذاتية التغذية Heterotrophs تؤمن غذاءها بطريقة رميّة من مواد عضوية متحللة في الوسط أو عن طريق تطفلها على بعض الكائنات الحية الأخرى الموجودة في محيطها، وفي المقابل توجد بعض الأنواع ذاتية التغذية Autotrophs التي تؤمن الطاقة اللازمة لتصنيع غذائها العضوي إما من الضوء Photoautotrophs عبر عملية البناء الضوئي، أو عن طريق أكسدة بعض المواد الكيميائية Chemoautotrophs الموجودة في الوسط عبر عملية البناء الكيميائي، ويمكن لقسم ثالث من هذه الكائنات أن يعيش معيشة تكافلية Symbiosis مع كائنات أخرى حيث يتبادلان المنفعة سويًّا.

المساهمة في دورة النيتروجين في الطبيعة: تحتاج جميع النباتات إلى النيتروجين من أجل تصنيع موادها البروتينية، ولكنها لا تستطيع تثبيت النيتروجين الجوي، وتقوم مجموعتان من البكتيريا بتثبيت النيتروجين الجوي وتحويله إلى نيتروجين محتجز ضمن مركبات عضوية، فتعيش المجموعة الأولى حرة ضمن التربة، ومنها البكتيريا آزوتوباكتر Azotobacter وكلوستريديوم Clostridium، بينما توجد الثانية متعايشة مع جذور بعض النباتات ضمن العقد الجذرية، ومنها البكتيريا ريزوبيوم Rhizobium، (Al-Falih 2002)). وتتغذى الحيوانات على النباتات مستمدة منها النيتروجين الذي يسهم في بناء الأحماض الأمينية، ومن ثم البروتين في أجسام الحيوانات، ومع موت النباتات والحيوانات تتفكك البروتينات إلى أحماض أمينية مختلفة، ويجري بواسطة مجموعة من البكتيريا Ammonifying bacteria وعبر عملية إنتاج الأمونيوم Ammonification تحويل الأحماض الأمينية إلى مركب الأمونيا، ويمكن خلال هذه العملية أن ينطلق قسم من الأمونيا بشكل غازي إلى الجو، إلا أن القسم الأعظم منها يبقى في التربة على هيئة أملاح الأمونيوم، وتقوم أجناس أخرى من البكتيريا وعبر عملية التآزت Nitrification بتحويل أملاح الأمونيوم إلى

نترات، ومنها بكتيريا النتروزوموناس Nitrosomonas والنيترو باكتر Nitrobacter، حيث يمكن لجذور النبات امتصاص النترات والاستفادة منها ثانية في تصنيع البروتينات النباتية، وهكذا تتكرر دورة النيتروجين مرة أخرى (الرحمة، 1998م).

وتسبب البكتيريا للنباتات أيضًا بعض الأمراض مثل مرض قرحة الليمونCitrus canker الناجم عن الإصابة ببكتيريا زانتوموناس Xanthomonas citri، وتظهر أعراض المرض في البدء على هيئة تقرحات دائرية ذات حواف لامعة على الوجه السفلي للأوراق، ثم لا تلبث هذه التقرحات أن تمتد لتنتشر على أجزاء مختلفة من المجموع الخضري، وهناك أيضًا مرض شحوب أوراق نبات الأرز الناجم عن الإصابة ببكتيريا Xanthomonas oryzae، حيث يبدأ المرض على هيئة خطوط طولية صفراء في مقدمة الورقة، ثم تمتد هذه الخطوط نحو الأسفل لتؤدي إلى شحوب كامل للنصل، وقد يصل الشحوب إلى منطقة الغمد.

ثالثًا: الفطرية Fungi

تُعدّ الفطريات كائنات غير ذاتية التغذية، ولا تحتوي على أصباغ الكلوروفيل؛ لذا فإنها لا تستطيع القيام بالبناء الضوئي، وتختلف بسبب ذلك في طريقة تغذيتها عن النباتات الخضراء، فهي تؤمن غذاءها العضوي من مصادر مختلفة، إما من كائنات حية، وتحدث لها ضررًا، وتسمى فطريات متطفلة Parasitic fungi، أو تتغذى على مواد عضوية ميتة، وتسمى فطريات مترممة Saprophytic fungi، أو يعيش بعضها معيشة تبادل منفعة مع غيرها من النباتات دون أن تُحدث لها أي ضرر، وتسمى الفطريات المتكافلة Symbiotic fungi كما هو الحال في الفطريات الأشنية، وبعض الفطريات ينمو على جذوع الأشجار كما في الشكل (6-3).

الشكل (6-3): نمو أنواع من الفطريات على جذوع الأشجار.

هناك الكثير من هذه الفطريات ذات فائدة عظيمة للإنسان (البسيوني، 2001م، بغدادي، 1974م) كالأنشطة التخمرية لفطر الخميرة والأنشطة البيولوجية والحيوية لفطر البنيسليوم المنتج للمضاد الحيوي بنيسيلين، وفي المقابل تتطفل بعض أجناس الفطريات الزقية على نباتات المحاصيل والزينة وأشجار الفاكهة وغيرها مسببة لها أمراضًا كثيرة وخطيرة، مثل أمراض البياض الدقيقي، وجرب التفاح، وتعفن أكواز الذرة، وتجعد أوراق الخوخ، وغيرها. وفيما يلي بعض الفطريات المتطفلة التي تسبب أمراضًا للنباتات:

فطر البوجو كانديدا Albugo candida

يُعدّ هذا الفطر إجباري التطفل Obligatory parasite، ويسبب مرض الصدأ الأبيض لنباتات الفصيلة الصليبية White rust of crucifers وخاصة تلك النباتات ذات الأهمية الاقتصادية كالفجل، واللفت، والكرنب، وتحتوي عائلة Albuginaceae على جنس واحد إجباري التطفل هو الجنس Albugo الذي يحتوي على أنواع عدة، وتتميز هذه العائلة بأن لها حوامل صولجانية الشكل تحمل عليها سلاسل من الحوافظ البوغية Sporangia يكون أصغرها هو الأقرب إلى الحامل، وتترتب الحوافظ البوغية على شكل طبقة عمادية تحت البشرة في النباتات المصابة.

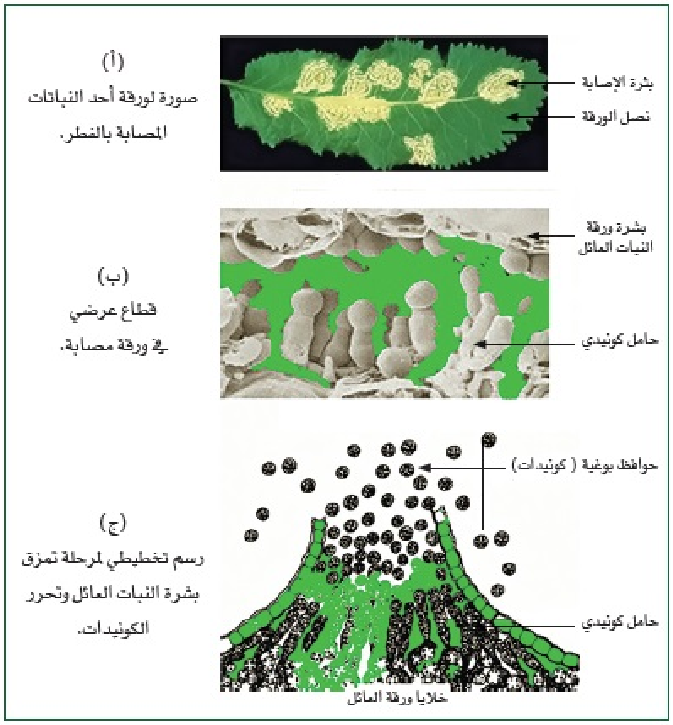
وتظهر الإصابة على شكل بثرات متناثرة بارزة شمعية بيضاء اللون تأخذ أشكال حلقات متداخلة، وذلك على أجزاء مختلفة من المجموع الخضري للنبات، خصوصًا على الأوراق، والسيقان، والنورات، الشكل (6-4، أ).

تبدأ الإصابة عندما تسقط إحدى الأبواغ السابحة للفطر على جزء من القسم الخضري للنبات، حيث تُنبت البوغة في وجود نقطة ماء مكونة أنبوبة إنبات دقيقة، لا تلبث هذه الأنبوبة أن تدخل من خلال أحد الثغور إلى الأنسجة الداخلية للنبات، حيث تنمو هناك مكونة خيطًا فطريًّا بين الخلايا.

التكاثر اللاجنسي

يبدأ التكاثر اللاجنسي عند هذا الفطر عن طريق تجمع وتكاثف بعض خيوط الفطر (الهيفات) تحت بشرة النبات العائل مكونة غزلًا فطريًّا، ثم يبرز من الغزل الفطري المتشكل زوائد صولجانية قائمة غير متفرعة تسمى الحوامل الكونيدية Conidiophores تنمو متعامدة مع بشرة النبات، وتستمر الأطراف العلوية للحوامل في الاستطالة، فتضغط على بشرة النبات مسببة انفصالها عن الأنسجة التي تحتها، وبذلك تتخذ بثرة الإصابة ذلك المظهر الأبيض اللامع، ثم تتقطع هذه الأطراف بشكل تدريجي ومتسلسل من الأعلى في اتجاه الأسفل معطية أجسامًا مستديرة يكون أكبرها سنًّا أبعدها عن الغزل الفطري، وتدعى هذه الأجسام حوافظ بوغية أو كونيديات Conidia، الشكل (6-4، ب، ج).

وتضغط الحوامل والحوافظ البوغية على بشرة النبات، فتمزقها، وتنتشر بفعل الهواء لتصيب نباتات جديدة، وعند توافر الرطوبة الكافية تبدأ محتويات الحوافظ البوغية في الانقسام مكونة عددًا كبيرًا من الأبواغ السابحة بواسطة سوطين، التي يمكن لها أن تُنبت معطية أنابيب إنبات تدخل عبر الثغور إلى الأنسجة الداخلية للنبات العائل، وهكذا تتكرر الإصابة بهذا الفطر.


(أ)
صورة لورقة أحد النباتات المصابة بالفطر.
بثرة الإصابة
نصل الورقة
(ب)
قطاع عرضي في ورقة مصابة.
بشرة ورقة النبات العائل
حامل كونيدي
(ج)
رسم تخطيطي لمرحلة تمزق بشرة النبات العائل وتحرر الكونيدات.
حوافظ بوغية (كونيدات)
حامل كونيدي
خلايا ورقة العائل

الشكل (6-4): فطر البوجو كانديدا Albugo candida

التكاثر الجنسي

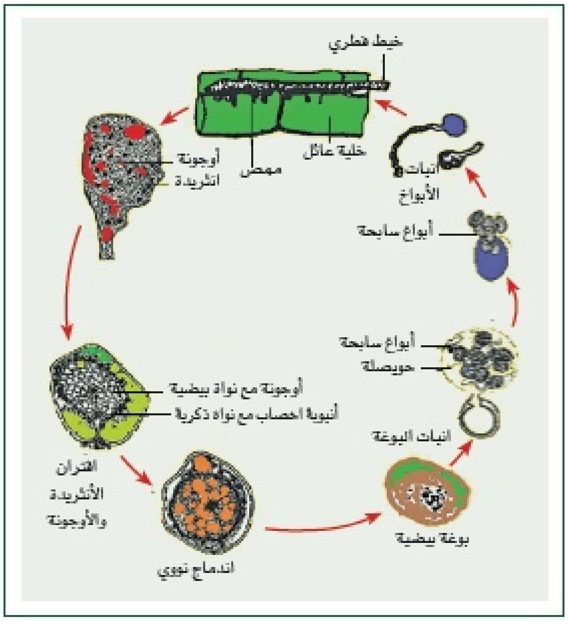
يحدث التكاثر الجنسي في الظروف البيئية غير الملائمة لنمو الفطر، فعندما يبدأ النبات العائل بالجفاف، وتشارف دورة حياته على النهاية يبدأ الفطر بتشكيل أعضاء جنسية مذكرة وأخرى مؤنثة.

وتظهر نتوءات بسيطة على بعض الهيفات، ثم لا تلبث أن تنتفخ مكونة جسمًا كرويًّا تتجمع فيه النواة والسيتوبلازم، وينفصل عن باقي الهيفا بواسطة جدار عرضي، الشكل (6-5)، وينقسم الجسم الكروي اختزاليًّا، ويتحول إلى عضو تأنيث (أوجونة Oogonium) أحادي المجموعة الصبغية (n1)، ويظهر من هيفا أخرى مجاورة أو من الهيفا نفسها بروز أنبوبي الشكل صغير نسبيًّا يمتلئ بالسيتوبلازم والأنوية، وينفصل عن باقي الهيفا بواسطة جدار عرضي، وينقسم البروز الأنبوبي أيضًا اختزاليًّا، ويتحول إلى عضو تذكير (أنثريدة Antheridium) أحادي المجموعة الصبغية (n1).

ويتقابل عضو التذكير مع عضو التأنيث، ثم تبرز من عضو التذكير أنبوبة إخصاب تخترق جدار عضو التأنيث حتى تصل إلى البيضة، وتنتقل بعدها أنوية الأنثريدة إلى داخل البيضة، وتنجح نواة ذكرية واحدة في إخصاب نواة البيضة، في حين تختفي جميع الأنوية الذكرية الأخرى.

وبعد إتمام الإخصاب تتكون البيضة الملقحة Zygot التي تغلف نفسها بجدار سميك متحولة إلى بوغة بيضية Oospore، وتبقى الأبواغ البيضية داخل نسيج العائل إلى أن يموت، ويتحلل في التربة، فتنتقل الأبواغ البيضية إلى التربة، وتبقى فيها ساكنة مدة من الزمن، وتبدأ بعدها أنويتها في الانقسام غير المباشر، وتحيط كل نواة ناتجة نفسها بجزء من السيتوبلازم متحولة إلى بوغة سابحة (n2).

ويتمزق جدار البوغة البيضية، وتخرج منه حويصلة رقيقة تحتوي بداخلها الأبواغ السابحة، التي لا تلبث إن توافر لها النبات العائل والظروف المناسبة أن تنطلق من الحويصلة، وتُنبت معيدة دورة الحياة من جديد.

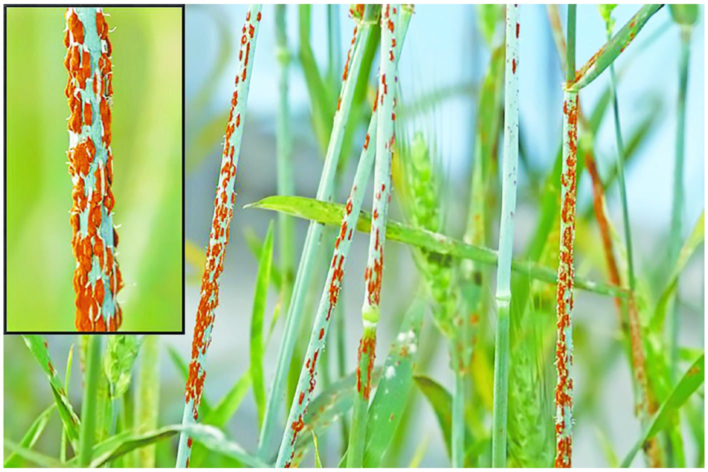

خيط فطري
خلية عائل
ممص
أوجونة
انثريدة
انبات الأبواغ
أبواغ سابحة
أبواغ سابحة
حويصلة
انبات البوغة
بوغة بيضية
اندماج نووي
اقتران الأنثريدة والأوجونة
أوجونة مع نواة بيضية
أنبوبة إخصاب مع نواة ذكرية

الشكل (5-6): التكاثر الجنسي عند فطر البوجو كانديدا Albugo candida

فطر صدأ القمح graminis Puccinia

يعيش هذا الفطر متطفلًا إجباريًا على النباتات مسببًا لها مرض صدأ القمح، ويكمل دورة حياته على عائلين نباتيين مختلفين: أحدهما نجيلي مثل القمح أو الشعير أو الشوفان (الشكل 6-7) والآخر ثنائي الفلقة هو البري بري Berberis vulgaris، ويُساعد الجو الدافئ الرطب على انتشار المرض، الذي تظهر أعراضه على القمح وغيره من النجيليات على هيئة بثرات برتقالية أو سوداء تتركز

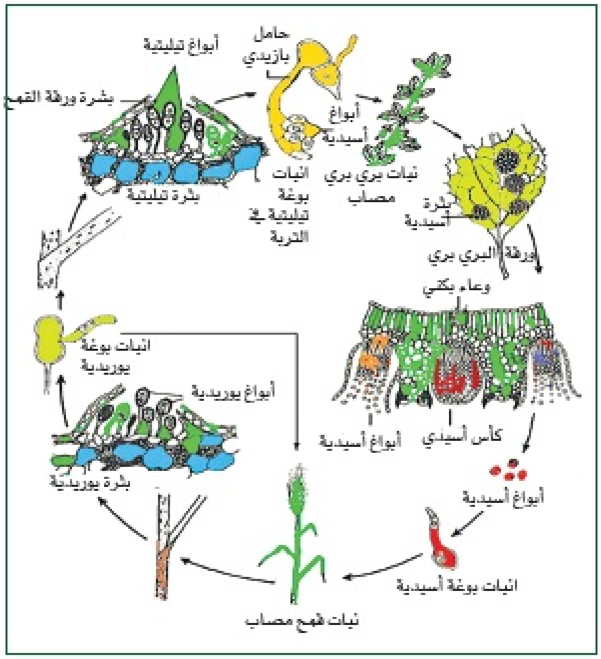
على الأوراق والسيقان، وتقود إلى اصفرار الخلايا، وتلف الأنسجة، وتناقص إنتاجية النبات أو موته، ومن ثم يُسبب هذا الفطر خسائر فادحة في محصول القمح، تُقدر بالملايين من الدولارات سنويًّا.



الشكل (6-7): يبين نمو فطر صدأ القمح على المجموع الخضري لنبات القمح.

وتتميز دورة حياة هذا الفطر بأنها طويلة نسبيًّا، وتتضمن خمسة أطوار بوغية، هي:

1. الطور اليوريدي Uredio stage: تبدأ إصابة نبات القمح وغيره من النجيليات في فصل الربيع عن طريق أبواغ منتشرة في الهواء وحيدة الخلية ثنائية النوى من النمط الأسيدي Aecidiospores أو من النمط اليوريدي Urediospores، وتستقر هذه الأبواغ على سطح الورقة، ومع توافر الرطوبة المناسبة فإنها تُنبت معطية أنابيب إنبات دقيقة تخترق بشرة النبات العائل عن طريق الثغور في اتجاه الأنسجة الداخلية، حيث تبدأ في النمو والانقسام مشكلة الغزل الفطري الذي تحتوي كل خلية من خلاياه على نواتين أحاديتي المجموعة الصبغية (n1)، ويبدأ الغزل الفطري بدوره في إعطاء أبواغ يوريدية، تضغط على بشرة النبات العائل، فتؤدي إلى تمزقها، حيث تبدو الإصابة عندها على هيئة بثرات برتقالية اللون، وتبدو الأبواغ اليوريدية بيضوية أو كروية الشكل، وتتألف من خلية واحدة، تحتوي بداخلها نواتين، وتُحاط بجدارين: أحدهما خارجي خشن يحتوي عددًا من ثقوب الإنبات، والآخر داخلي رقيق، الشكل (6-8)، وتكون هذه الأبواغ محمولة على أعناق ضعيفة، لا تلبث أن تنفصل عنها، وتنتشر مع الهواء لتُصيب نباتًا نجيليًّا آخر، وهكذا تتكرر الإصابة مرات ومرات طالما كانت الظروف البيئية مناسبة؛ لذا يُدعى هذا الطور بالطور المتكرر.


أبواغ تيليتية
حامل بازيدي
بشرة ورقة القمح
أبواغ أسيدية
انبات بوغة تيليتية في التربة
نبات بري بري مصاب
بثرة تيليتية
بثرة أسيدية
ورقة البري بري
وعاء بكني
انبات بوغة يوريدية
أبواغ يوريدية
كأس أسيدي
أبواغ أسيدية
بثرة يوريدية
أبواغ أسيدية
انبات بوغة أسيدية
نبات قمح مصاب

الشكل (8-6): دورة حياة فطر صدأ القمح Puccinia graminis.

2. الطور التيليتي Teleuto stage: يظهر هذا الطور في نهاية موسم نمو النبات النجيلي العائل، حيث يبدأ الغزل الفطري المنتشر في الورقة المصابة بإنتاج أنواع أخرى من الأبواغ تُدعى الأبواغ التيليتية Teleutospores التي تتشكل ضمن بثرات تيليتية Teleutosori داكنة اللون ومنتشرة على الساق وأغماد الأوراق.

وتبدو البوغة التيليتية معنقة، وبنية اللون، ومدببة القمة ومؤلفة من خليتين تنفصلان عن بعضهما بحاجز بسيط، الشكل (8-6)، وتحتوي كل خلية على نواتين أحاديتي المجموعة الصبغية، لا تلبثان أن تندمجا في نواة واحدة ثنائية المجموعة الصبغية، وتحاط كلتا الخليتين بجدار سميك أملس يجمعهما، ويحتوي على ثقب إنبات مقابل قمة كل خلية.

وتتحمل البوغة التيليتية الظروف البيئية القاسية، وتبقى غالبًا متصلة مع نسيج النبات النجيلي العائل حتى تتحلل أنسجته، حيث تظل في التربة ساكنة طيلة الشتاء.

3. الطور البازيدي Basidio stage: تبدأ الأبواغ التيليتية في الإنبات مع توافر الظروف الملائمة، حيث يخرج من كل خلية في البوغة حامل بازيدي على هيئة أنبوب صغير، ثم لا تلبث نواة كل خلية أن تنزلق داخل الحامل، وتنقسم انقسامين متتاليين: أولهما اختزالي مؤدٍّ إلى إنتاج أربع أنوية أحادية المجموعة الصبغية.

وينقسم بعدها الحامل البازيدي بحواجز عرضية بين الأنوية لتتشكل أربع خلايا كلٌّ منها وحيدة النواة، وينبثق من كل خلية بازيدية نتوء أو ذنيب صغير ينتهي بانتفاخ كروي، تنتقل إليه نواة الخلية البازيدية، ثم ينفصل الانتفاخ ليكون بوغة بازيدية Basidiospore، وبذلك تتكون على الحامل أربع أبواغ بازيدية، الشكل (6-8)، تكون اثنتان منها من النمط السالب (-)، واثنتان من النمط الموجب (+)، وتنفصل هذه الأبواغ بعد نضجها عن الحامل، وتنتقل بواسطة الرياح لتصيب نبات البري بري، الذي يمثل العائل الثاني في دورة حياة هذا الفطر.

4. الطور البكني Pycnio stage: تبدأ البوغة البازيدية في الإنبات على سطح ورقة نبات البري بري معطية خيطًا دقيقًا، يخترق طبقة الأدمة ونسيج البشرة، ثم ينمو ويتفرع ضمن الأنسجة الداخلية، ليعطي غزلًا فطريًّا، بحيث تحتوي كل خلية من خلاياه على نواة واحدة، ولا يلبث هذا الغزل الفطري أن يعطي على السطح العلوي للورقة أوعية بكنية Pycnidia قارورية الشكل، تنتهي بفتحة ضيقة.

وتحتوي الأوعية البكنية خيوطًا خصبة َينتهي كل منها بسلسلة من الأبواغ البكنية، وتفصل هذه السلاسل عن بعضها خيوط عقيمة، ونجد داخل الأوعية البكنية نمطًا ثالثًا من الخيوط الطويلة التي تبرز من فوهة الوعاء البكني، وتدعى بخيوط الاستقبال Receptive hypha التي تستقبل الأبواغ البكنية القادمة إليها من وعاء بكني آخر.

ولأنه يوجد نوعان من الأبواغ البازيدية -سالبة وموجبة- لذلك، فإننا نميز أيضًا نوعين من الأوعية البكنية -بعضها موجب وبعضها سالب- التي تختلف عن بعضها وراثيًّا.

وتقوم الأوعية البكنية بإفراز سائل حلو المذاق، ما يجذب الحشرات إليها، ويسهم في نقل الأبواغ فيما بينها، حيث تستقبل خيوط استقبال الأوعية الموجبة السلالة الأبواغ المنقولة إليها من الأوعية السالبة، والعكس صحيح.

وتبدأ عملية الإخصاب بالتحام بوغة بكنية مع خلية طرفية لخيط استقبال مغاير لها وراثيًّا، فتنتقل نواة البوغة البكنية إلى الخلية الطرفية، ما يقود إلى ظهور خلية ثنائية النوى، تعطي بتوالي انقساماتها غزلًا فطريًّا، جميع خلاياه ثنائية النوى.

5. الطور الأسيدي Aecidio stage: ينمو الغزل الفطري المتكون داخل الأوعية البكنية متجهًا نحو السطح السفلي لورقة البري بري، معطيًا مجموعة من الكؤوس الأسيدية Aecidia، التي تبرز فوهتها في اتجاه السطح السفلي للورقة، ويوجد في قاعدة كل كأس أسيدية صف من الخلايا المتطاولة التي تكون كل منها ذات نواتين أحاديتي المجموعة الصبغية، والتي تُعرف بالخلايا المولّدة للأبواغ الأسيدية Aecidiospores، وتنشأ الأبواغ الأسيدية اعتبارًا من هذه الخلايا على هيئة

سلاسل، وتتخلل الأبواغ ضمن كل سلسلة خلايا بينية، تُفيد من خلال تحللها لاحقًا في انفصال الأبواغ الناضجة عن بعضها.

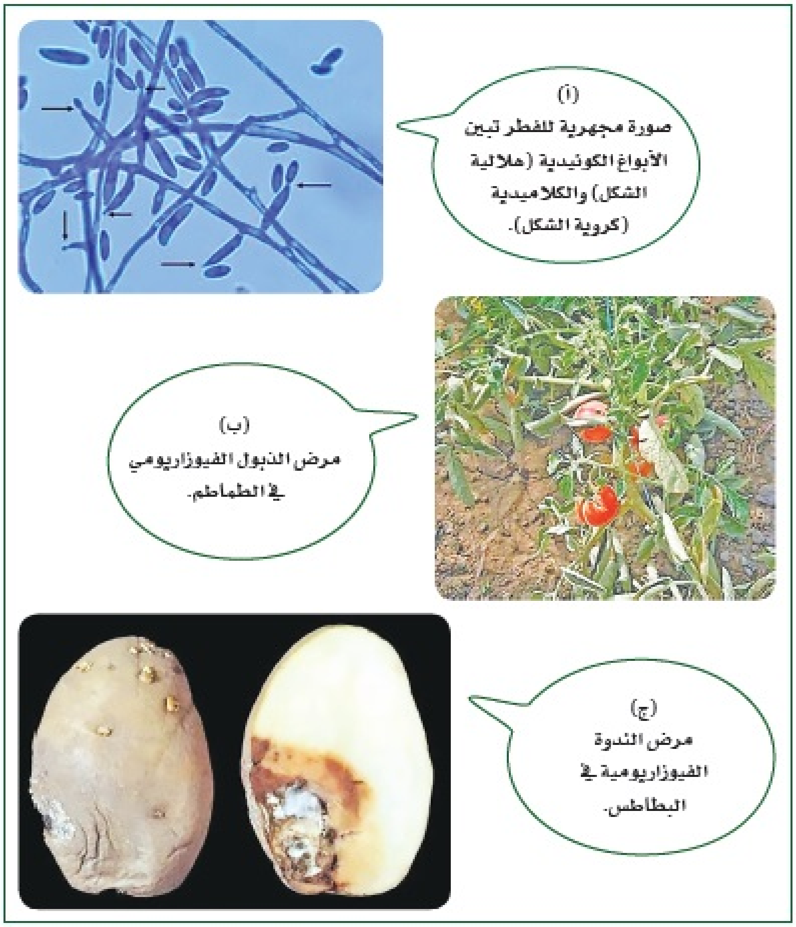
وتنتقل الأبواغ بواسطة الرياح، وتُصيب نبات القمح في بداية موسم النمو، وهكذا يعيد فطر صدأ القمح دورة حياته من جديد.

فطر الفيوزاريوم Fusarium sp.

تعيش بعض أنواع هذا الفطر حياة رمية، بينما يعيش بعضها الآخر حياة طفيلية، وتسبب بعض أنواع هذا الفطر كالنوع Fusarium solani أمراضًا جلدية خطيرة للإنسان، وتسبب الكثير من أنواعه المتطفلة خسائر كبيرة في المحاصيل الحقلية، حيث يصيب نباتات مختلفة من العائلة الباذنجانية كالبندورة (الطماطم) والبطاطا (البطاطس) والفلفل، إضافة إلى نباتات أخرى كالقطن، والفاصولياء، والقمح مسببًا ذبولًا للنبات يعرف باسم الذبول الفيوزاريومي Fusarium wilting، الشكل (6-9)، وتبدأ الإصابة بهذا الفطر بعد إنبات إحدى أبواغه في التربة، حيث يتشكل غزل فطري أولي، لا يلبث أن يخترق نسج الجذر إما اختراقًا مباشرًا في منطقة القمة النامية، أو عن طريق أحد الجروح في الجذر، فينتقل بعد ذلك عبر الأوعية الخشبية إلى الأقسام العليا من النبات (السراني وآخرون، 2002م)، ويؤدي إلى مرض النبات بإحدى طريقتين:

- يتكاثر الفطر لاجنسيًا بشكل غزير داخل الأوعية الخشبية مؤديًا إلى انسدادها وعدم وصول الماء والأملاح المعدنية الممتصة من التربة إلى الأقسام الهوائية، ما يقود إلى ذبول النبات وموته.

- يفرز الفطر مادة حمضية سامة (حمض الفيوزاريك Fusaric acid) تؤدي إلى موت الأنسجة واصفرار الأوراق وذبولها.

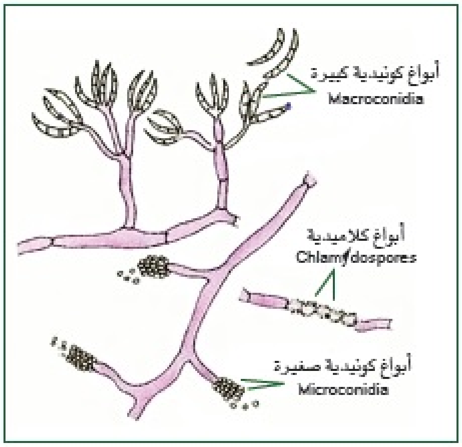

(أ)
صورة مجهرية للفطر تبين الأبواغ الكونيدية (هلالية الشكل) والكلاميدية (كروية الشكل).
(ب)
مرض الذبول الفيوزاريومي في الطماطم.
(ج)
مرض الندوة الفيوزاريومية في البطاطس.

الشكل (6-9): فطر الفيوزاريوم Fusariums sp. وبعض الأمراض التي يسببها.

يشكل فطر الفيوزاريوم خلال التكاثر اللاجنسي نوعين من الأبواغ:

أ. أبواغ كلاميدية Clamydospores: تبدو هذه الأبواغ كروية ذات جدر سميكة أحادية أو ثنائية الخلايا، وتتشكل من الغزل الفطري مباشرة إما في وسطه أو في أطرافه، وذلك نتيجة لانتفاخ وتحوصل إحدى الخلايا الهيفية، وتقوم الأبواغ الكلاميدية عند إنباتها بإنتاج غزل فطري أولي يخترق أنسجة الجذر وصولًا إلى الأوعية الخشبية، الشكل (6-10).

ب. أبواغ كونيدية Conidospores: وهي أكثر أنواع الأبواغ الفطرية انتشارًا، وتتشكل على حوامل كونيدية، يكون بعضها صغيرًا كرويًّا أو بيضوي الشكل، وبعضها الآخر يكون كبيرًا بيضوي الشكل أو هلالي الشكل، مقسمًا بشكل عرضاني (3 - 6 حواجز)، الشكل (6-10).


أبواغ كونيدية كبيرة
Macroconidia
أبواغ كلاميدية
Chlamydospores
أبواغ كونيدية صغيرة
Microconidia

الشكل (10-6) فطر الفيوزاريوم Fusarium

وتظهر الأبواغ الكلاميدية والأبواغ كونيدية الكبيرة والصغيرة على حوامل كونيدية.

الفصل السابع

الأحياء الدقيقة في المحيط الجذري

Microorganisms In Rhizosphere

- أولاً: بكتيريا المحيط الجذري Rhizobacteria
- ثانياً: الفطريات الجذرية Mycorrhizae

الفصل السابع

الأحياء الدقيقة في المحيط الجذري

Microorganisms In Rhizosphere

ترتبط الكائنات الحية الدقيقة النباتية phytomicrobiome مع جميع الأنسجة النباتية، وبالاشتراك مع النبات، فإنها تشكل ما يعرف باسم Holobiont وهي وحدة بيئية منفصلة تكون فيها الأنواع الميكروبية الكثيرة موجودة في داخل النبات العائل، وتنظم النباتات تكوين ونشاط المجتمع البكتيري المرتبط بها بعناية، وتوفر هذه الميكروبات مجموعة واسعة من الخدمات والفوائد للنبات، وفي المقابل، يزود النبات المجتمع الميكروبي بالكربون ومركبات أيضية أخرى، والتربة بشكل عام بيئة رطبة وغنية بالكربون المختزل ما يدعم نمو ووجود مجتمعات كائنات حية دقيقة واسعة في التربة، وميكروبات المحيط الجذري Rhizomicrobiome تعدّ الخلية ذات أهمية كبيرة للزراعة بسبب التنوع الغني لإفرازات الجذور وبقايا الخلايا النباتية التي تجذب أنماطًا متنوعة وفريدة من نوعها من الاستعمار الميكروبي، وتؤدي ميكروبات المحيط الجذري أدوارًا رئيسة في اكتساب المغذيات واستيعابها، وتحسين نسيج التربة، وإفرازها، وتعديل الجزيئات خارج الخلية مثل الهرمونات، والأنشطة الأيضية الثانوية، والمضادات الحيوية، ومركبات الإشارات المختلفة، وكل ذلك يؤدي إلى تعزيز نمو النبات، ويقدر متوسط عرض المحيط الجذري نحو 1 مم، على الرغم من أنه قد يصل إلى 12 مم بالنسبة إلى بعض الأنواع، وذلك وفق مسافة استجابة الفطريات للمواد المفرزة من جذور النباتات، ويُعدّ المحيط الجذري للنبات مرتعًا خصبًا لنمو عدد من الكائنات الحية الدقيقة؛ وذلك لتوافر المواد المغذية والمركبات الضرورية لنمو وتكاثر الأحياء الدقيقة، حيث يفقد النبات نحو 10-40% من المواد المتكونة في عملية البناء الضوئي عن طريق الجذور، وإضافة إلى الكربون فإن الجذور تفرز مختلف المركبات الرئيسة الموجودة عادة في الخلية، وأبرزها المواد المخاطية والأحماض العضوية والفينولات، وغيرها من المركبات الأخرى، وتشتمل هذه الكائنات الحية في محيط الجذر Rhizosphere على أحياء دقيقة، ومنها بكتيريا التربة والفطريات إضافة إلى بعض الحيوانات الأولية، والديدان الخيطية، والحشرات، وغيرها.

ولا شك في أن توافر هذه الكائنات في المحيط الجذري وتجمعها وغزارة أعدادها يعتمد على كثير من المتغيرات مثل تركيب التربة، ونوع النباتات، ونوع جذورها، وعمر تلك الجذور، ومناطقها، والعوامل البيئية ومدى الإصابة بالميكروبات الممرضة والمواد المفرزة من تلك الجذور، علمًا أن هذه الكائنات الحية تتأثر، وتؤثر في تركيب ونوعية تلك المواد المفرزة من جذور النباتات، وذلك عبر تأثيرها في إفرازات الخلية، وأيضها، ونشاطها، وتغذية النبات.

أولًا: بكتيريا المحيط الجذري Rhizobacteria

من ضمن الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في المحيط الجذري مجموعة تشمل بكتيريا حقيقية ممرضة للنبات Phytopathogenic bacteria وأخرى غير ممرضة، ومن دون شك تستطيع بعض هذه البكتيريا غير الممرضة التأثير في نمو النبات بزيادته أو تأخيره، ولقد عرفت أهمية هذه المجموعة البكتيرية من الأحياء الدقيقة ودور بعضها في بقاء جذور النبات سليمة ودور بعضها أيضًا في امتصاصها للكربون وللمغذيات وفي تحمل بعض الإجهادات البيئية القاسية.

ونظرًا للحاجة الماسة إلى تحسين نمو النباتات وزيادة الإنتاجية تبحث دائمًا العوامل المؤثرة في نمو النبات، وحيث إن المنطقة المحيطة بالجذر تتوافر بها المغذيات فإنها تساند نمو الكائنات الحية الدقيقة حولها، ومن هذه الكائنات وبالذات المجتمع البكتيري مجموعة تعرف باسم بكتيريا الجذورRhizobacteria ومنها تحت مجموعة تحتل الجذور مسببة تنشيطًا مباشرًا لنمو النبات أو سيطرة (تحكم) أحيائية للكائنات الممرضة للنبات، ومنه وردت التسمية ببكتيريا الجذور المنشطة لنمو النبات Plant-Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)، وهذا المصطلح عام يشمل جميع أجناس البكتيريا التي تنشط نمو النبات، ويضم مصطلح PGPR عددًا كبيرًا من الأجناس البكتيرية، ومنها:

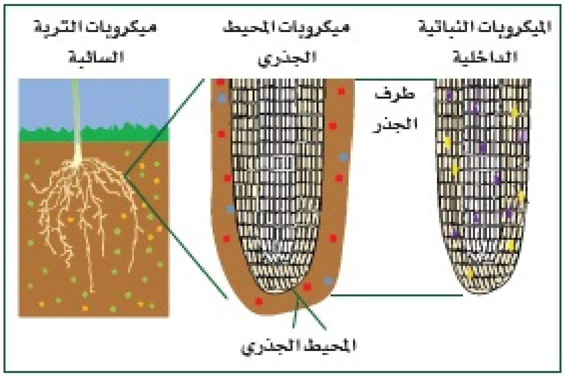
Burkholderia, Acetobacter, Azoarcos, Azospirillum, Azotobacter, Bacillus, Achromobacter, Anahaena, Phyllobacterium, Frankia, Hydrogenophaga, Kluyvera, Microcoleus, Clostridium, Enterohacter, Flavobacteriu, Streptomyces, Pseudomonas, Rhizobium

ويدخل معها جنس Vibrio وبكتيريا Serratia, Staphylococcus.

ويتم التعرف إلى بكتيريا المحيط الجذري بطريقة النمط الظاهري Phenotypic methods التقليدية بزراعة البكتيريا في وسط غذائي، أو بطريقة النمط الوراثي Genotypic methods حيث تستخدم التقنيات الجزيئية molecular techniques باستخلاص الحمض النووى DNA وتحليل تتابع المورثات للحمض النووي rRNA، ويضاف إلى ذلك الطريقة المنقحة لكثافة الحمض النووي DNA المتمثلة في معاملة النبات في مكانه المزروع فيه بغاز ثاني أكسيد الكربون المعلم $^{13}CO_2$ ومن ثم استخلاص الحمض النووي الرايبوزومي، وهذه النتائج تخضع لتقنية تفاعل البلمرة المتسلسل PCR amplification.

وتشكل الكائنات الحية الدقيقة والمركبات التي تفرزها منبهات حيوية قيمة، وتؤدي دورًا محوريًّا في تعديل استجابات إجهاد النبات، وقد أثبتت الأبحاث أن تلقيح النباتات بالبكتيريا الجذرية التي تعزز نمو النبات Plant-Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)

أو معالجة النباتات بمركبات إشارة من ميكروب إلى نبات يمكن أن تكون إستراتيجية فعالة لتحفيز نمو المحاصيل، وعلاوة على ذلك، يمكن لهذه الإستراتيجيات تحسين تحمل المحاصيل لإجهادات العوامل البيئية (مثل الجفاف، والحرارة، والملوحة) التي من المحتمل أن تصبح أكثر تكرارًا مع استمرار تطور ظروف تغير المناخ، ونتج عن هذا الاكتشاف تركيبات متعددة الوظائف تعتمد على PGPR للزراعة التجارية؛ لتقليل استخدام الأسمدة الاصطناعية والكيماويات الزراعية، ويستدل من البحوث الكثيرة مساهمة هذه البكتيريا وغيرها من ميكروبات المحيط الجذري في كثير من نشاطات النبات سواء بطريقة مباشرة أو غير مباشرة؛ نظرًا لما عرف عنها من قدرات مفيدة مرتبطة بنشاطات النبات ونموه (الشكل 7-1)، حيث تتميز هذه البكتيريا بقدرتها على تثبيت النيتروجين الجوي لوجود أنزيم النيتروجينيز، ومن ثم توافر قدر جيد من احتياجات النبات النيتروجينية، وإن بعضها يستطيع إذابة وإتاحة بعض العناصر الضرورية كالفسفور والحديد وغيره، إضافة إلى تحسين تحمل النبات لبعض المعادن الثقيلة.



الشكل (7-1): انتشار ميكروبات المحيط الجذري في الجذور وفي التربة.

تستغل تقنية المزارع المائية بكفاءة عالية مفيدة، ومنافسة من الناحية التطبيقية الزراعية، خاصة لبعض نباتات المحاصيل مثل الطماطم، والخيار، والقرع، وغيرها، ولقد أدت هذه التقنية إلى توافر هذه المحاصيل على طوال العام، وليس في موسم محدد وبتكلفة أقل؛ ولذا فهذه التقنية زادت من الإنتاجية العامة للمحاصيل على الرغم من عدم ملاءمة الظروف المناخية والتربة في بعض المناطق من العالم. وفي المقابل ينظر الآن إلى العوامل الأحيائية وظروف نمو النبات في الأوساط البيئية ومجتمع المحيط الجذري من كائنات حية دقيقة ومتغيرات ودراستها، ومن ثم محاولة التحكم بها في محاولة لزيادة إنتاجية النبات النامي في الطبيعة وبطرق الاستخدام الزراعي السائد في الأراضي الزراعية بعد تحسينها، والنبات الذي ينمو في ظل ظروف الحقل ليس فردًا، فإنه مجتمع معقد (Lundberg et al. 2012) مع علاقات شراكة دقيقة ومستمرة نسبيًا، ودائمًا ما يرتبط مجتمع الكائنات الحية الدقيقة المبني جيدًا والمنظم جيدًا بالنبات، وهذا المجتمع هو ما يعرف باسم phytomicrobiome (Smith et al 2017)، وإن phytomicrobiome إضافة إلى النبات هو

ما يعرف باسم Holobiont، وتوجد علاقات مجتمع الكائنات الحية الدقيقة مع جميع الكائنات متعددة الخلايا، وربما جميع حقيقيات النوى، وفي الواقع، من المحتمل أن تكون هذه قبل استعمار الأرض بالنباتات (Berg et al. 2014). وارتبط هذا المجتمع الميكروبي بالنباتات الأرضية منذ تطورها الأول؛ لمساعدة النباتات البرية المبكرة التي واجهت تحديات مثل الوصول إلى العناصر الغذائية، والظروف الجديدة والمرهقة في كثير من الأحيان ومسببات الأمراض، وتقوم بعض السلالات من بكتيريا المحيط الجذري المنشطة لنمو النبات ببناء بعض منظمات النمو النباتية، مثل الأوكسين والجبريلين والسيتوكاينين والإيثيلين أو بإنتاج مركبات متطايرة، وهذه المواد بمن ثم قد تسهم في تنشيط النمو وزيادته، وهناك ما يفيد بتأثير هذه البكتيريا في جهاز البلاستيدات الخضراء المسؤولة عن عملية البناء الضوئي بزيادة بعض الصبغات النباتية، ولقد تم استخدام بعض السلالات لبكتيريا المحيط الجذري منفردة أو مشتركة في تكوين مخصبات حيوية Biofertilizers.

وتحتل هذه المجموعة من البكتيريا Rhizobacteria جذور النبات مسببة تنشيطًا لنمو النبات أو سيطرة (تحكم) أحيائية للكائنات الممرضة للنبات، ويتلخص دور بكتيريا المحيط الجذري على النبات، في عملية التنشيط والسيطرة، وآلية التنشيط تدور حول مقدرة البكتيريا وتأثيرها في جذور النبات ونموها، مثل تثبيت النيتروجين ومنظمات النمو وإذابة العناصر وامتصاصها وتخفيض تأثيرات الإجهادات البيئية المتنوعة، ففي مجال (التنشيط) فإن مجموعة من هذه البكتيريا تسهم في كثير من العمليات التي تؤثر في نشاط وأيض النبات بتوفير مواد يحتاج إليها النبات أو تؤثر فيه، حيث تؤثر بعض السلالات في شكل الجذور الظاهري، وتزيد من المساحة السطحية للجذور، ولكن الإنتاجية تعتمد على نظام الخصوبة المستخدم في عملية إنتاج المحصول الزراعي، وفي مجال السيطرة قد عرف عن بعض السلالات من هذه البكتيريا قدرتها على تكوين مركبات مضادة لبعض الكائنات الممرضة مثل مركب الفينازين Phenazine ومن ثم تحمي النبات أو تزيد من مقاومة النبات للممرضات النباتية.

وهناك عناصر (بما في ذلك البكتيريا والفطريات) من البكتيريا النباتية المرتبطة بجميع الأجزاء النباتية الرئيسة (الزهور، والفواكه، والسيقان، والأوراق، والجذور). ومع ذلك، تختلف الظروف اختلافًا كبيرًا بين هذه الأجزاء، ما يؤدي إلى تشكل مجموعات ميكروبية متخصصة تستعمر كلًّا منها، والمجتمع الميكروبي المرتبط بالجذور (Rhizomicrobiome)، هو الأكثر اكتظاظًا بالأنواع وتفصيلًا من بين كل تلك المرتبطة بالنباتات العليا، وأفضل مثال مفهوم ومميز هو بكتيريا Rhizobia المثبتة للنيتروجين المرتبطة بجذور نباتات البقوليات، ولا يمكن استزراع كثير من أفراد phytomicrobiome، وقد كان أن بدأت محاولات منذ ظهور علم metagenomics الذي يدرس التراكيب الجينية للعينات المأخوذة من البيئة، والطرق ذات الصلة التي تمكننا من تقييم كيفية تغيير الأفراد بحسب الظروف والنمط الوراثي للنبات وتطور النبات.

ويمارس النبات سيطرة كبيرة على تكوين ميكروبات المحيط الجذري (Zhang et al. 2017)، وينتج إفرازات جذرية لتركيبات مختلفة، يمكن أن تكون أكثر ملاءمة بوصفها مصدرًا للكربون المختزل لبعض الميكروبات من غيرها، وينتج النبات أيضًا مركبات إشارة تجند أنواعًا معينة، وتنظم أنشطتها الجينية والكيميائية الحيوية، إضافة إلى ذلك، يتولى المجتمع الميكروبي في التربة جوانب مختلفة من التنظيم الذاتي للمحيط الجذري (Leach et al., 2017، ويمكن للميكروبات إنتاج مركبات استشعار النصاب للتواصل عندما تتطلب الظروف تحولًا فسيولوجيًّا جماعيًّا، وقد تطورت النباتات للاستجابة لمركبات استشعار النصاب Quorum Sensing الميكروبي وإنتاج نظائرها، ما يوفر للنباتات مستوى آخر من التنظيم على ميكروبات المحيط الجذري Rhizomicrobiome. وأخيرًا، أصبح من الواضح الآن أن هناك درجة معينة من التسلسل الهرمي داخل مجتمع الكائنات الحية الدقيقة phytomicrobiome وأن هناك أعضاء رئيسين يطلق عليهم (الأنواع المحورية) أو الأنواع الأساسية (Toju et al. 2018)، التي يتم تنظيم أنشطتها بواسطة النباتات، وتقوم الأنواع المحورية بدورها بتنظيم الأنشطة الأوسع نطاقًا داخل المجتمع الميكروبي النباتي، ومن المحتمل أن تكون معظم الأنواع المحورية جزءًا من phytomicrobiome لمدة طويلة جدًّا، ما يسمح بتطوير موقعها المركزي، وفي التربة، هناك تدرج في علاقة الألفة بين جذور النبات والميكروبات الممتدة بعيدًا عن جذر النبات: تزداد درجة تأثير النبات في المجتمع الميكروبي بالقرب من سطح الجذر (الشكل 1)،

ويشار إلى هذه المنطقة الآن بشكل عام باسم منطقة الجذور أو المحيط الجذري Rhizosphere، ومع ذلك، فإن المصطلح قد صاغه في الأصل (Hiltner 1904) لوصف الكائنات الحية الدقيقة في التربة حول الجذور وداخلها، والآن يظهر أن الميكروبات التي تعيش على سطح الجذر تستعمر الجذور، ويقال: إن الكائنات التي تعيش داخل الجذر هي نباتات داخلية (Gray and Smith 2005؛Zhang et al. 2017)، وتمثل عضيات الميتوكوندريا والبلاستيدات الخضراء بعضًا من أقدم جوانب مجتمع الكائنات الحية النباتي وأكثرها ألفة، ولقد تطورت من ميكروبات مرتبطة بالنباتات إلى بنى خلوية دائمة نراها اليوم.

وأظهر فهمنا الحالي لمجتمع الكائنات الحية النباتي phytomicrobiome جانبين رئيسين: أولًا، لا نعرف إلا القليل عن هذا الأمر (Quiza et al., 2015)، وثانيًا، أظهرت العلاقات التي درسناها بين أعضاء الجذور والنباتات أن هناك إمكانات هائلة في استغلال هذا المجتمع من الكائنات الحية الدقيقة لزيادة إنتاج المحاصيل في جميع أنحاء العالم (Barea 2015)، ولعلي في هذا الفصل أقوم بتحديث بعض الجوانب فيما يتعلق بدور البكتيريا الجذرية المعززة لنمو النبات (PGPR) في الزراعة، بوصفه مدخلًا زراعيًّا تجاريًّا منخفض التكلفة، وتوفر التركيبات الحيوية للمنتجات لتعزيز نمو النبات وخصوبة التربة وقمع مسببات الأمراض النباتية بدائل خضراء للكيماويات الزراعية التقليدية (Arora et al. 2016)، ويمكن تطوير المنتجات الزراعية على أساس لقاح حي وحيد

أو متعدد الأنواع أو على أساس جزيئات إشارة معزولة، وفي حالة مركبات الإشارة، يمكن للمرء استخدام إشارات ميكروب إلى نبات؛ للتأثيرات المباشرة على النباتات، أو حتى إشارات من نبات إلى آخر لتحفيز إنتاج محسن لإشارات الميكروب إلى النبات في بيئة التربة، بافتراض وجود الكائن الحي الدقيق المرغوب فيه في التربة، ويمكن للمرء أيضًا استخدام إشارات من نبات إلى آخر للتحكم في تكوين بكتيريا المحيط الجذري النباتية phytomicrobiome بطرق مفيدة لنباتات المحاصيل.

ولم يتم تحديد تطوير اللقاحات القائمة على PGPR بدقة، ولكنه يتضمن بشكل عام الخطوات الآتية:

1. عزل البكتيريا من الجذور أو الأنسجة النباتية الأخرى.

2. فحص المختبر وبيئة النمو الخاضعة للرقابة.

3. الفرز الميداني لمجموعة من المحاصيل والمواقع الجغرافية ومواعيد الزراعة وأنواع التربة.

4. تقييم التوليفات الممكنة من السلالات المناسبة.

العلاقات بين المحيط الجذري للنباتات ومجتمع الكائنات الحية الدقيقة phytomicrobiome قديمة، وتمثل نتيجة تطور مشترك طويل جدًّا، والتطور عملي ومستمر ولا هوادة فيه، وعلينا أن نتوقع اكتشاف كثير من العلاقات الإضافية والمفاجئة في بعض الأحيان، التي تعود بالفائدة على المحاصيل، ومن ثم إنتاج الغذاء العالمي، ومن الواضح أن أعضاء phytomicrobiome يقدمون إمكانات هائلة من حيث ممارسات إدارة المحاصيل الجديدة والأكثر استدامة، ومع ذلك، من الواضح أيضًا أننا نفهم قدرًا ضئيلًا فقط من هذه الإمكانات، ولا يزال هناك الكثير الذي يتعين القيام به.

وربما تكون أسهل منطقة للاستغلال في البداية هي حول سلالات مفردة أو اتحادات ذات أعداد صغيرة من الأعضاء ومركبات الإشارة التي ينتجونها، ويمكن أن تركز هذه على تحفيز نمو النبات، ولا سيما في ظل الظروف القاسية، مثل الإجهاد الحراري والجفاف، التي أصبحت منتشرة بشكل متزايد مع تقدم تغير المناخ، ويمكن أن تركز مجموعة أخرى من المنتجات على مكافحة أمراض النبات، ولقد درسنا الخطوات اللازمة لتطوير هذه التقنيات إلى منتجات واعتمادها للبيع من خلال العملية التنظيمية.

وفي الوقت نفسه، هناك قلق عام حول استخدام (المواد الكيميائية) ويُنظَر إلى المواد البيولوجية على أنها بديل إيجابي، في شكل بروبيوتيكات نباتية "plant probiotics" وهي بكتيريا قادرة على تحسين إنتاج المحاصيل الزراعية وتقليل أو حتى الاستغناء عن الأسمدة الكيماوية، ويوفر phytomicrobiome إمكانات هائلة للمنافع الزراعية، من حيث الأمن الغذائي العالمي، واستدامة إنتاج المحاصيل وجعل النظم الزراعية مرنة لتواكب التغيرات المناخية، وعلى الرغم من أن نتائج استخدام هذه البكتيريا في المعامل وتحت الظروف المحكمة أظهرت دلائل مرضية إلا أن تطبيقاتها

في الطبيعة ما زالت دون ذلك وفي بداياتها وغير واضحة تمامًا، وعلى الرغم من كثرة الدراسات في هذا الموضوع على مختلف الظواهر الفسيولوجية والجزيئية لسلالات بكتيريا الجذور المنشطة لنمو النبات والمقترحات والآراء الكثيرة لتفسير هذه الظاهرة والقول: إن آلية التنشيط بواسطة هذه الكائنات قد تكون ناتجة عن مجموعة من آليات عدة، إلا أنه ليس هناك اتفاق عام وموحد بين الباحثين، ومن هنا فمن المهم تحسين طرق اختيار ونوعية اللقاح المناسب عند الحاجة لتطبيق محدد؛ لأن فعالية اختيار بكتيريا الجذور المنشطة لنمو النبات والمثبتة للنيتروجين حاسمة لتطوير هذه التقنية والوصول إلى زيادة إنتاجية النبات.

فسيولوجيا البكتيريا الجذرية المعززة لنمو النبات

أدى التطور المشترك للميكروبات النباتية إلى أن تصبح بعض البكتيريا نباتات داخلية اختيارية داخل الخلايا، ومن بين هذه البكتيريا التي تعيش بحرية، PGPR التي لها تأثيرات مفيدة في النباتات من خلال آليات مباشرة وغير مباشرة، وتم استخدام البكتيريا الجذرية المفيدة لتحسين امتصاص الماء والمغذيات، وتحمل الإجهاد البيئي والحيوي، وعلى الرغم مما نشر عن كثير من بكتيريا التربة لتعزيز نمو النبات وتطوره، إلا أن طريقة (أساليب) العمل التي تظهر بها البكتيريا أنشطة مفيدة غالبًا ما تكون غير مفهومة جيدًا، وبدأ التعرف إلى الأساس الجزيئي لآليات تفاعل البكتيريا النباتية المسؤولة عن التغيرات الفسيولوجية، ويرجع ذلك أساسًا إلى بعض الأساليب الناشئة (Bulgarelli et al. 2013).

اكتساب المغذيات بواسطة PGPR

عادةً ما تحتوي التربة ذات البيئة الميكروبية الديناميكية والمواد العضوية العالية على سماد أقل من التربة المدارة تقليديًّا (Bender et al. 2016). فعلى سبيل المثال، غالبًا ما يُؤخذ في الحسبان النشاط الجرثومي الأكبر في التربة عند إدارة استخدام مصادر المغذيات العضوية، وبدأت أبحاث مجتمع الكائنات الحية النباتي Phytomicrobiome في الكشف عن تفاعلات محددة بين النبات والميكروبات التي تساعد بشكل مباشر على تغذية النبات (Beattie 2015)، وتعمل الميكروبات التي تساعد على اكتساب المغذيات النباتية (الأسمدة الحيوية) من خلال مجموعة متنوعة من الآليات بما في ذلك زيادة مساحة السطح التي يمكن الوصول إليها عن طريق جذور النباتات، وتثبيت النيتروجين، وإذابة الفسفور P، وإنتاج حامض الحديد، إضافة إلى إنتاج سيانيد الهيدروجين والأمونيا ($NH3$) ذات النشاط المهم لـ PGP لسلالات تعزيز نمو النبات. لذلك، فإن التحكم في النشاط الجرثومي لديه إمكانات كبيرة لتزويد المحاصيل بالمتطلبات الغذائية.

وأكثر العلاقات المفيدة التي تمت دراستها واستغلالها على نطاق واسع هي العلاقة بين النباتات والبكتيريا المفيدة التي يتم تثبيتها للنتروجين، وفي هذه العلاقة، توفر العقد الجذرية في البقوليات للبكتيريا الكربون المختزل وبيئة محمية وظروفًا لاهوائية مطلوبة لنشاط أنزيم النيتروجينيز

Nitrogenase، بينما توفر البكتيريا للنباتات البقولية إتاحة النيتروجين الحيوي، وضمن هذا التعايش، يخضع كل من بكتيريا المحيط الجذري والبقوليات لتحولات كبيرة، وتشكل البقوليات عضوًا جديدًا، وهو العقدة Nodule، لإيواء البكتيريا الجذرية Rhizobia، وتتغير البكتيريا بدورها من نوع الخلية التي تعيش معيشة حرة إلى نوع من البكتيريا المتفرعة المثبتة للنيتروجين (Oke and Long 1999)، وتسهم عملية تثبيت النيتروجين N-fixation في العقد الجذرية بكميات كبيرة من النيتروجين في النظم الزراعية العالمية، مع تقديرات تتراوح من 20 إلى 40 = Tg Teragram (kg) $40x10^9$ نيتروجين Nitrogen في السنة (Galloway et al. 2008)، وتُعدّ اللقاحات بالبكتيريا الجذرية Rhizobial inoculants للمحاصيل البقولية هي أقدم مثال على المنتجات الميكروبية التجارية في الزراعة، ولا تزال تمثل اللقاحات الزراعية الأكثر استخدامًا، ومع ذلك، فإن التحسينات الجينية في كفاءة التكافل المثبت للنيتروجين في الجذور ونباتات المحاصيل كانت بعيدة المنال، ويُعدّ تثبيت النيتروجين الجوي والتحويل إلى الأمونيا Ammonia عملية تتطلب الطاقة، ما يعني أنه يجب تفضيل الفسفرة المؤكسدة لمصادر الكربون لتوليد ATP على تخليق الجليكوجين داخل الخلية البكتيرية؛ لزيادة تثبيت النيتروجين، ومع ذلك، فإن التجارب التي أجريت على طفرات حذف تخليق الجليكوجين من بكتيريا Rhizobium Tropici لم تنجح في بيئات التربة، على الرغم من زيادة المادة الجافة وعدد العقد الجذرية في نباتات الفول الملقحة (Marroquí et al. 2001).

وابتداءً من أوائل القرن الحادي والعشرين، بدأ الاهتمام يتزايد حول تطوير اللقاحات التجارية للبكتيريا المثبتة للنيتروجين التي تعيش بحرية مثل: *Azoarcus sp*و*Burkholderia sp*. و*Gluconacetobacter sp*. و*Diazotrophicus sp*. *Herbaspirillum sp*. وBacillus polymyxa. Azotobacter sp، وخاصة Azospirillum sp. (Vessey, 2003)، وتوفر هذه الديازوتروفات diazotrophs ذات الحياة الحرة نيتروجين لمجموعة من نباتات المحاصيل على نطاق أوسع بكثير من بكتيريا الجذور Rhizobia، وكانت لقاحات Azospirillum التجارية، التي تنتجها الشركات الصغيرة والمتوسطة في جميع أنحاء العالم، فعالة في زيادة غلة محاصيل الحبوب المختلفة (Bashan and de-Bashan 2015)، وثبت أن البكتيريا الأخرى التي لا تُثبت النيتروجين تزيد من امتصاص النيتروجين في النباتات، ما يزيد من كفاءة استخدام النيتروجين، ويرجع ذلك على الأرجح إلى زيادة نمو الجذور، ما يسمح للنباتات بالوصول إلى المزيد من طبقات التربة، وفقًا لقانون Liebig الخاص بالحد الأدنى في الاعتبار، فإن المغذيات الآتية الأكثر تحديدًا لنباتات المحاصيل بعد النيتروجين N عادة ما تكون الفسفور P، بينما تحتوي معظم التربة الزراعية على كميات كبيرة من P، وإن الكثير منها في أشكال غير قابلة للذوبان، ولتكملة التربة الأصلية بكميات كافية من الفسفور P، يتم عادةً إخصاب المحاصيل بالفوسفات الصخري المستخرج من أحد الرواسب القليلة كبيرة الحجم (يقدر أن ما يصل إلى 85% من الفوسفات الصخري في العالم موجود في المغرب والصحراء الكبرى الغربية)، وعلاوة على ذلك،

فإنه يمكن للكائنات الحية الدقيقة التي تعمل على إذابة الفسفور Phosphorus (PSMs) Solubilizing Microorganisms أن تساعد النباتات للوصول إلى خزان الفسفور غير القابل للذوبان عن طريق إطلاقه من أشكاله المتحدة بمكونات أخرى، ويمكن إذابة الفسفور غير العضوي المركب مع Ca أو Fe أو Al بواسطة الأحماض العضوية أو أيونات H+ التي تفرزها PSMs، وبالمثل، يمكن لأنزيم الفيتيز Phytase الذي تنتجه PSM أن يحرر الفسفور التفاعلي من المركبات العضوية، وكان يُعتقد في الأصل أن إنتاج سيانيد الهيدروجين والأمونيا (NH3) بواسطة PGPR يعزز نمو النبات عن طريق قمع مسببات الأمراض، ومع ذلك، فقد تم تحدي هذه الفكرة مؤخرًا من قبل Rijavec (2016) وLapanje، اللذين جادلا بأن إنتاج سيانيد الهيدروجين والأمونيا (NH3) يزيد بشكل غير مباشر من توافر الفسفور من خلال إزالة معدن ثقيل وعزل هذه الكيانات الجيوكيميائية، وتنتج PSM أحماضًا عضوية لتقليل سمية المعادن باستخدام هذه المركبات لتحويل أنواع من المعادن إلى أشكال غير متحركة أو محاليل منها قابلة للتنقل، ليتم نقلها إلى الأنسجة النباتية لمزيد من إمكانيات استخلاص النبات (Ahemad 2015)، وتم تسويق بكتيريا *Bacillus megaterium* التي تعمل على إذابة الفسفور باسم BioPhos (BioPower) ويمكن أن تقلل متطلبات الأسمدة الفوسفاتية للمحاصيل الزراعية بنسبة تصل إلى 75%، وتم تسويق سلالات *Pseudomonas striata* و*B. Polymyxa* و*B. megaterium* بواسطة AgriLife (الهند) (Mehnaz 2016).

والعناصر الغذائية الأخرى، مثل الحديد والزنك يمكن أن تحد من غلة المحاصيل، وكذلك الفسفور والحديد يمكن أن يكونا وفيرين في التربة، ولكنهما غير متاحين للنباتات، وتزيد كثير من السلالات البكتيرية من توافر الحديد من خلال إنتاج الأحماض العضوية أو حامض الحديد (Ahmed and Holmstrom 2014)، وتعمل Siderophores أيضًا على التحكم في الأحياء الدقيقة المسببة للأمراض عن طريق حرمانها من Fe، وتم تطوير تركيبة تجارية للبكتيريا الناقلة للحديد Fe، *Acidithiobacillus ferrooxidans* بواسطة AgriLife (الهند) (Mehnaz 2016)، على الرغم من أن هذا الجنس يذوب الحديد على ما يبدو من خلال إنتاج الأحماض العضوية بدلًا من حامض الحديد، وثبت أن كثيرًا من سلالات البكتيريا الناقلة للزنك تزيد من امتصاص الزنك، ومن ثم تزيد الإنتاج في كثير من المحاصيل، بما في ذلك الأرز، والقمح، وفول الصويا، في حين أن آليات نقل الزنك Zn لا تزال غير مؤكدة، فمن المحتمل أن تكون مماثلة لتلك الخاصة بـ PSMs وFe-mobilizers؛ أي إنتاج عوامل مخلبية وأحماضًا عضوية (Hafeez et al., 2013).

تبادل الإشارات بين جذور النبات وبكتيريا المحيط الجذري

الهرمونات النباتية التي تنتجها PGPR

الهرمونات النباتية تؤدي دورًا رئيسًا في تنظيم نمو النبات وتطوره، وإنها تعمل بوصفها إشارات جزيئية استجابة للعوامل البيئية التي تحد من نمو النبات أو تصبح قاتلة عند عدم السيطرة عليها (Fahad et al., 2015)، ومن المعروف أن كثيرًا من بكتيريا المحيط الجذري تفرز الهرمونات لامتصاص الجذور أو تتلاعب بتوازن الهرمونات في النباتات لتعزيز النمو والاستجابة للتوتر.

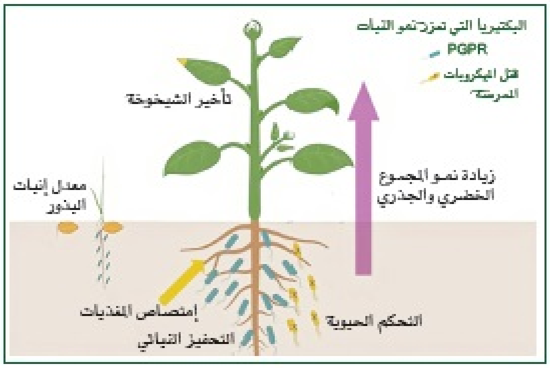
ويمكن لكثير من البكتيريا الجذرية التي تعزز نمو النبات PGPR إنتاج الأكسيناتAuxins لممارسة تأثيرات قوية بشكل خاص في نمو الجذر (Jha and Saraf 2015) وبناء المجموع الجذري، وحمض الإندول 3-أسيتيك Indole-3-acetic acid (IAA) هو الأكسين الأكثر دراسة الذي تنتجه PGPR، وتشارك في التفاعلات بين النبات والميكروبات، وتعتمد وظيفة IAA الخارجية على مستويات IAA الذاتية في النباتات، وفي تركيزات IAA المثلى في النباتات، قد يكون لتطبيق IAA البكتيري آثار محايدة أو إيجابية أو سلبية في نمو النبات (Spaepen and Vanderleyden 2011). ولقد ثبت أن PGPR الذي ينتج الأكسينات يؤدي إلى إحداث تغييرات نسخية في الجينات المرتبطة بالهرمونات والجينات المرتبطة بالدفاع وجدار الخلية (Spaepen et al., 2014)، ويحفز استطالة الجذور، ويزيد الكتلة الحيوية للجذر، ويقلل من الثغور، إضافة إلى الحجم والكثافة، وتنشيط جينات استجابة Auxin التي تعزز من نمو النبات وزيادة إنتاجيته (وينتج كثير من PGPR) السيتوكينين والجبريلين (Gupta et al. 2015) ولكن دور الهرمونات المصنَّعة بكتيريًّا في النباتات، وآلية التوليف البكتيرية، لم يتم بعد فهمها تمامًا، ويمكن لبعض سلالات PGPR أن تعزز كميات كبيرة نسبيًّا من الجبرلين، ما يؤدي إلى تعزيز نمو فسائل النبات (Jha and Saraf 2015)، ويمكن أن يؤدي تفاعل هذه الهرمونات مع الأكسينات إلى تغيير بنية الجذر، ويمكن أن يؤدي إنتاج السيتوكينينات بواسطة PGPR أيضًا إلى زيادة إنتاج إفرازات الجذر من قِبل النبات (Ruzzi and Aroca 2015) ما يزيد من وجود البكتيريا الجذرية PGPR المرتبط بالنبات. والإيثيلين Ethylene هو هرمون غازي، نشط بتركيزات منخفضة للغاية (0.05 mL L-1) وهو (هرمون الإجهاد Stress hormone) كما يتضح من ارتفاع تركيزه في أثناء الضغوط اللاحيوية والحيوية المختلفة abiotic and biotic stresses، وقد يؤدي تراكم الإيثيلين استجابة للإجهاد إلى زيادة تحمل النبات أو تفاقم أعراض الاستجابة للضغط والشيخوخة، وتمت دراسة وظيفة PGPR في ظل كل من الظروف المجهدة وغير المجهدة، وغالبًا ما توفر تحفيزًا أكبر للنمو في ظل الظروف البيئية الصعبة، على سبيل المثال، تحت ضغط الجفاف (Rubin et al., 2017). ويؤدي الإيثيلين دورًا مهمًّا في تحسين تحمل الإجهاد النباتي لبعض البكتيريا الجذرية المعززة لنمو النبات: تفرز البكتيريا الجذرية PGPR مركبًا مهمًّا يعرف باسم aminocyclopropane-1--1 carboxylase (ACC) الذي يقلل من إنتاج الإيثيلين في النباتات، وأظهرت كثير من الدراسات زيادة تحمل الإجهاد في النباتات من خلال التلقيح بـالبكتيريا الجذرية PGPR التي تنتج ACC deaminase، ويبدو أن هذا يحدث؛ لأن PGPR قادرة على الحفاظ على مستويات الإيثيلين من

الوصول إلى مستويات كافية لتقليل نمو النبات (Ruzzi and Aroca 2015)، كما تم توضيح ذلك مع بكتيريا sativa Camelina (Heydarian et al., 2016).

إشارة جزيئات الميكروب إلى النبات

يمكن لمجموعة واسعة من الأنشطة الأيضية الثانوية والمركبات العضوية المتطايرة Volatile Organic Compounds (VOCs) التي تنتجها البكتيريا لتحسين تحمل الإجهاد و/ أو تحفيز النمو في النباتات، فعلى سبيل المثال، تؤدي البولي أمينات أدوارًا فسيولوجية ووقائية مهمة في النباتات، ووُجِد أن بكتيريا B. megaterium تفرز BOFC15 بولیامین Polyamine، وسبيرميدين Spermidine، وتحث على إنتاج البوليامين في نبات Arabidopsis، ما يؤدي إلى زيادة الكتلة الحيوية، وتغيير بنية الجذر، وزيادة القدرة على التمثيل الضوئي، وأظهرت النباتات الملقحة ارتفاعًا في تحمل الجفاف ومحتوى حمض الأبسيسيك Abscisic Acid (ABA) تحت إجهاد نقص المياه الناجم عن‎PEG (Zhou et al., 2016) . وتنتج مجموعة من PGPR مركب سيانيد الهيدروجين HCN، الذي يمكنه التحكم في مستوى الميكروبات الضارة في منطقة الجذور (Kumar et al. 2015)، وتحفز المركبات العضوية المتطايرة التي تنتجها PGPR نمو النبات، ما يؤدي إلى زيادة الكتلة الحيوية للنباتات وتحسين مقاومة إجهاد النبات.

وتؤثر الميكروبات الموجودة في المحيط الجذري النباتي أيضًا في أنشطة بعضها من خلال مركبات الإشارة، وهذه الإشارات تصل إلى هرمونات الكائنات الحية الدقيقة والنباتية، فعلى سبيل المثال، يمكن أن يعمل اللوميكروم والريبوفلافين Lumichrome and Riboflavin بوصفهما مركبات إشارة من ميكروب إلى نبات قادرة على تحفيز نمو النبات، ويمكن أن يسبب كلا المركبين تغييرات ذات مغزى في تطوير النبات، ويمكن أن يسرع Lumichrome في ظهور الأوراق (نمو أسرع) وتمدد الأوراق (نمو محسن). إضافة إلى ذلك، يمكن أن يزيد من ارتفاع النبات وإجمالي مساحة الورقة، ما يؤدي إلى تحسين إنتاج الكتلة الحيوية (الشكل 7-2)، ويصدق هذا التأثير على مجموعة واسعة من أنواع النباتات بما في ذلك كل من النباتات أحادية الفلقة وثنائية الفلقة (Dakora et al. 2015).



الشكل (7-2): تأثيرات بكتيريا المحيط الجذري في المجموع الخضري والمجموع الجذري للنبات.

وقد ثبت أن مركبات الإشارة التي تنبعث من الكائنات الحية الدقيقة إلى النبات تزيد من نمو النبات لأنواع مختلفة، ولا سيما عندما تنمو النباتات في ظل ظروف بيئية قاسية (Zipfel and Oldroyd, 2017). ومستقبل سكريات lipo-chitooligosaccharides الدهني هو LysM kinase لتكافل البقوليات الجذرية، ويبدو أن نظام المستقبلات هذا قد تطور لاكتشاف العوامل الممرضة منذ القدم، ولا يزال يتعين تحديد إشارة الميكروب إلى النبات في تكافل N2-fixing Frankia المثبت للنيتروجين، ولكن يبدو أنها ليست LCO (Chabaud et al., 2016).

إشارة جذور النبات إلى الميكروب

تظهر النباتات تحكمًا كبيرًا في الميكروبات المرتبطة بها (Massalha et al., 2017)؛ حتى من اختلافات النمط الجيني البسيطة داخل الأنواع النباتية يمكن أن يكون لها تأثيرات ذات مغزى، وبعض هذه السيطرة ناتجة عن إشارات بين الكائنات الحية (Smith et al., 2017)، وتبدأ عندما تتشرب البذرة وتنبت، ثم عندما تنمو الجذور، وتكتمل في النهاية، يتم إطلاق الجزيئات من الجذور إلى التربة المحيطة، وتدعم هذه الجزيئات نمو الميكروبات ونشاطها في منطقة الجذور، ويوفر التباين في إفرازات الجذور (التوقيت، والكمية، والمكونات) آلية يمكن للنباتات من خلالها التحكم في تكوين ووفرة الكائنات الحية الدقيقة المرتبطة بالجذور (Bakker et al. 2012).

ويُعتقَد أن الإفرازات تتكون أساسًا من السكريات والأحماض الأمينية والأحماض العضوية الموجودة بتركيزات عالية في سيتوبلازم النبات، ولكنها تتضمن أيضًا كميات أصغر من الأنشطة الأيضية الثانوية المعقدة مثل الفلافونويد، والتربينات، والمركبات الفينولية التي يمكن أن تجذب أنواعًا معينة من الميكروبات في الجذور، وقد تم اقتراح أن إفراز جزيئات الإشارة لحمض الجاسمونيك Jasmonic acid وحمض الساليسيليك Salicylic acid في الجذور يمكن أن يشارك في التفاعل بين الجذور والميكروبات خلال المراحل الأولية للاستعمار الميكروبي (Doornbos et al. 2011). ويتم تنظيم إفرازات الجذر وراثيًّا، ومن ثم يمكن أن يشكل مجتمعات جذرية متميزة لأنماط وراثية نباتية مختلفة، ما يؤدي إلى إفرازات متغيرة للغاية بين الأنواع النباتية، وأنواع النباتات الفردية داخل النوع نفسه، في مراحل نمو النبات المختلفة، وظروف النمو، والتفاعلات الحيوية.

تأثير بكتيريا المحيط الجذري والإجهاد البيئي في النبات

تحسن البكتيريا الجذرية PGPR نمو النبات في ظل ظروف النمو الصعبة، على الرغم من أن الآليات التي تنظم تحمل الإجهاد في النباتات معقدة ومعقدة، ويرجع ذلك جزئيًّا إلى أن النباتات

كائنات حية مستقرة وغير متحركة، وليس لديها خيار سوى الوقوف في مكانها والامتصاص، وتُعدّ عملية تحسين تحمل الإجهاد في نباتات المحاصيل من خلال التربية التقليدية عملية طويلة ومتنوعة ومتشعبة، بينما ترتبط الهندسة الوراثية بقضايا القبول الأخلاقي والاجتماعي، ويكتسب دور الكائنات الحية الدقيقة المفيدة أهمية في إدارة الإجهاد وتطوير الزراعة والمقاومة لتغير المناخ، وقد استغلت الدراسات الحديثة التقنيات الجزيئية لفهم طريقة عمل التفاعلات بين النبات والكائنات الحية الدقيقة ما يؤدي إلى تحمّل الإجهاد المستحث.

- **تحمل الإجهاد اللاحيوي المرتبط بـ PGPR**

تخفف بكتيريا *Pseudomonas putida* من إجهاد الجفاف في نباتات الحمص (*Cicer arietinum*) من خلال تعديل في الغشاء والأسموزية (البرولين والجليسين) وقدرة أنواع الأوكسجين التفاعلية المعروفة باسم Reactive oxygen species (ROS)، وتم تعديل استجابات الإجهاد بشكل إيجابي بواسطة البكتيريا ما أدى إلى التعبير التفاضلي للجينات المشاركة في التخليق الحيوي للإيثيلين (ACO وACS)، وحمض الساليسيليك (PR1)، وتنشيط نسخ الجاسمونيت (MYC2)، وSOD، وCAT، وAPX، وGST (رمز الأنزيمات المضادة للأكسدة)، DREB1A (ارتباط عنصر مستجيب للجفاف)، NAC1 (عوامل النسخ المعبر عنها تحت الضغط اللاحيوي)، LEA والديهيدرينات(DHN (Tiwari et al. 2016. وقد أدى استخدام مادة thuricin 17 التي تنتجها Bacillus thuringiensis على فول الصويا (Glycine max) في ظل ظروف نقص المياه إلى تعديل بنية الجذر وزيادة الكتلة الحيوية للجذور والعقيدات وطول الجذر وABA الجذر ومحتوى النيتروجين الكلي (Prudent et al. 2015). وتساعد الميكروبات المفيدة أيضًا النباتات على التعامل مع إجهاد الفيضانات وغمر النبات بالماء، فمثلًا شتلات الأرز (Oryza sativa) التي تم تلقيحها بـ ACC deaminase التي تنتج سلالة من Pseudomonas fluorescens زادت من استطالة الجذر في ظل ظروف غمرتها المياه باستمرار (Etesami et al. 2014).

ويمكن تقليل تأثيرات إجهاد الملح عن طريق نزع الأمين ACC، ونباتات البازلاء الملقحة بـالبكتيريا Variovorax paradoxus، التي تنتج أنزيم ACC deaminase، زادت من معدل التمثيل الضوئي، ونقل الإلكترون، واستتباب أيون متوازن من خلال زيادة تدفق K^+ إلى البراعم وترسب Na^+ على الجذور، وانخفاض مقاومة الثغور وضغط توازن النسيج الخشبي وزيادة الكتلة الحيوية تحت الإجهاد الملحي عند 70 و130 ملي مولار كلوريد الصوديوم (Wang et al. 2016)، وبالنسبة إلى البامية، فإن PGPR ينتج عنه تحمّل ملحي معزّز لـ ACC، ويزيد من أنشطة أنزيم مضادات الأكسدة (SOD وAPX وCAT)

وجينات مسار ROS المنتظمة (CAT وAPX وGR وDHAR)، وعززت شتلات الذرة الملقحة بـبكتيريا Bacillus amyloliquefaciens من تحمل الإجهاد الملحي، بما في ذلك تعزيز محتوى الكلوروفيل، مقارنةً بالسيطرة، وأظهر التحليل الإضافي أن الآليات كانت مرتبطة بمحتوى السكر الكلي القابل للذوبان المحسن ما أدى إلى انخفاض تدمير الخلايا، وتحسين نشاط أنزيم peroxidase/catalase ومحتوى الجلوتاثيون glutathione لكسح ROS، وانخفاض مستويات الصوديوم في النبات، وأظهرت نباتات القمح (Triticum aestivum) الملقحة بـالبكتيريا المتحملة للملوحة Dietzia natronolimnaea تنظيمًا للجينات المشاركة في سلسلة إشارات ABA، ومسار الملح شديد الحساسية (SOS)، وناقلات الأيونات، والأنزيمات المضادة للأكسدة، ويتم تحفيز تحمل الإجهاد عن طريق تعديل شبكة معقدة من عائلات الجينات (Bharti et al. 2016).

ويؤدي التعرض للبرد أو الحرارة إلى تقليل إنتاج المحاصيل الزراعية، وفي أسوأ السيناريوهات، يؤدي إلى فشل المحاصيل (Cheng 2014)، وتزيد بكتيريا المحيط الجذري المنتجة للجبريلين Serratia nematodiphila من نمو نبات الفلفل في ظل ظروف إجهاد درجات الحرارة المنخفضة، واحتوت النباتات الملقحة على المزيد من GA4 وABA وأقل من الساليسيليت Salicylate والجاسمونيت Jasmonate (Kang et al. 2015)، وأدى تلقيح نباتات الطماطم (Solanum lycopersicum) المعرضة لدرجات حرارة منخفضة باستخدام Pseudomonas vancoffeeensis وبكتيريا P. frederiksbergensis إلى زيادة التعبير عن جينات التأقلم البارد ونشاط مضادات الأكسدة في أنسجة الأوراق (Subramanian et al. 2015).

- **المكافحة الحيوية المستحثة لتحمل الإجهاد الحيوي**

تُعدّ البكتيريا *Bacillus amyloliquefaciens* عامل تحكم بيولوجي ضد *Rhizoctonia solani*، من خلال إطالة أمد التحمل ومن خلال الاستجابة الدفاعية المعززة في النباتات، وتعرض النباتات المستعمرة تعديلًا لإشارات الهرمونات النباتية، وصيانة مستدامة للمنتجين، وإنتاج أنشطة أيضية ثانوية وتوازن أنواع الأوكسجين التفاعلي ولاقطات ROS (Srivastava et al., 2016)، ونباتات القطن (Gossypium hirsutum) الملقحة بـبكتيريا Bacillus spp. أظهرت زيادة في إفراز حمض الجوسيبول gossypol والياسمونيك jasmonic ما أدى إلى تقليل تغذية اليرقات بواسطة Spodoptera exigua، وكانت مستويات نسخ الجينات المشاركة في تخليق allelochemicals وjasmonates أعلى في النباتات الملقحة كما كان قمع الآفة (Zebelo et al. 2016)، وتسبب البكتيريا Enterobacter asburiae المقاومة ضد فيروس تجعيد الأوراق الصفراء للطماطم عن طريق زيادة التعبير عن الجينات المرتبطة بالدفاع والأنزيمات المضادة للأكسدة، بما في ذلك phenylalanine ammonia lyase، وبيروكسيديز peroxidase، وكاتليز catalase (Li et al., 2016)، وقد أدى تلقيح التربة بالبكتيريا Paenibacillus lentimorbus إلى تقليل تراكم الحمض النووي RNA لفيروس فسيفساء الخيار Nicotiana tabacum cv. في

الأوراق بنسبة 91%، وقد ارتبط هذا بزيادة الإجهاد والتعبير الجيني المرتبط بالإمراض ونشاط أنزيم مضادات الأكسدة ما يشير إلى مقاومة مستحثة ضد الفيروس، وأدى استعمار PGPR إلى تحسين بناء الأنسجة وفسيولوجيا النباتات، ما أدى إلى إنتاج المزيد من الزهور والبذور (Kumar et al. 2016)، وتقوم البكتيريا أيضًا بإنتاج أنزيم ACC deaminase وتحث على التحمل ضد مرض اللفحة الجنوبية في الطماطم الذي يسببه *Scelerotium rolfsii*، وأظهرت النباتات الملقحة تعديلًا لمسار الإيثيلين وأنشطة أنزيم مضادات الأكسدة، وتم تأكيد التحمل المنتظم من خلال تحليل التعبير الجيني المرتبط بالعوامل الممرضة (Dixit et al. 2016)، وتسببت لاكتونات أسيل-هوموسيرين (Acyl-homoserine lactones (AHL المنتجة لـ Serratia Lactones في مقاومة جهازية مستحثة في الطماطم، وتم العثور على إفرازات الجذر التي تحتوي على مواد كيميائية تحاكي إشارات AHL، وتحفيز مجتمعات المحيط الجذري المفيدة، بينما تمنع البكتيريا المسببة للأمراض (Teplitski et al. 2000).

وقد وُجِد أن بكتيريا المحيط الجذري PGPR إلى جانب عملها بوصفها عوامل للمكافحة الحيوية، فإنها تحمي النباتات من مسببات الأمراض عن طريق إظهار أو إبراز استجابات دفاعية كيميائية حيوية وجزيئية داخل النبات، ويمكن أن تؤدي PGPR إلى تنشيط المقاومة الجهازية المستحثة Induced Systemic Resistance (ISR) في النباتات، ومن ثم ينشط الجينات المرتبطة بالإمراض، بوساطة مسارات إشارات الهرمونات النباتية والبروتينات التنظيمية الدفاعية لتهيئة النباتات ضد هجوم مسببات الأمراض في المستقبل (Pieterse et al. 2014)، وقد تم إثبات أن مركبات الإشارة البكتيرية والمحفزات الجزيئية المرتبطة بالميكروبات، مثل أوليغومرات الكيتين، تعدل تحريض ISR في النباتات، والعوامل المسببة للأمراض على سطح الخلية مثل الأسواط وكذلك O-antigen من عديدات السكريات الدهنية تثير ISR، في حين أن نظائر حمض الساليسيليك وحمض الجاسمونيك تحفز الإيثيلين لاستنباط NPR1 المقاومة النظامية المكتسبة (SAR) في النباتات (Ping and Boland 2004).

إستراتيجيات لتحسين استعمار لقاحات PGPR للجذور

في ظل الظروف البيئية المتنوعة، تؤدي العوامل الخارجية الأخرى دورًا مهمًّا في نجاح لقاحات بكتيريا المحيط الجذري، ويمكن إضعاف قدرة بكتيريا التربة على إحداث تأثيرات إيجابية في نمو النبات، ومن ثم يمكن أن تكون تأثيرات لقاحات بكتيريا المحيط الجذري محدودة ومتغيرة، ويتم استعمار جذور النبات بواسطة الكائنات الحية الدقيقة من التربة والبذور، وتعتمد محددات الكائنات الحية الدقيقة في التربة على خصائص مثل توافر الكربون C، والنيتروجين N، ومحتوى المادة العضوية، وتوافر المياه، ودرجة الحموضة، وكذلك الأنماط البيوجغرافية بما في ذلك نوع التربة والموسمية، ومن ثم، فإنه من الضروري تطوير إستراتيجيات لطرق التلقيح الفعالة، بحيث تكتسب

البكتيريا ذات الأهمية ميزة في كفاءة الاستعمار على الآخرين، وتحدد جودة المنتج وتوافقه واستقراره الاستقرار الفعال والأداء المتسق للقاح في ظل الظروف البيئية (Lee et al. 2016).

الأغشية الحيوية Biofilm مقابل لقاح العوالق

لقد ثبت أن الأغشية الحيوية المرتبطة بالنبات تثبت وجودها في أجزاء مختلفة من النباتات، مثل الأوراق، والجذور، والبذور، والأوعية الداخلية للنقل والتوصيل

(Ramey et al. 2004). ولا تؤدي القدرة على تكوين الأغشية الحيوية إلى تعزيز بقاء البكتيريا فحسب، بل تعزز أيضًا نمو النبات من خلال الآليات المختلفة المرتبطة بـ PGPR، غالبًا إلى حد أكبر من نظيراتها من الخلايا العوالق (Ricci 2015)، وميزة أخرى للأغشية الحيوية على الخلايا العوالق هي مقاومتها العالية للمضادات الحيوية، ما يؤدي إلى تحسين فرصة البقاء على قيد الحياة في بيئة التربة التنافسية (Mah et al. 2003)، ويعد هذا اعتبارًا مهمًّا عند تطبيق اللقاحات الميكروبية على التربة، حيث تواجه الكائنات الحية الدقيقة منافسة شديدة، وقد لا تتكيف بشكل جيد مع الظروف الصعبة مثل ميكروبات التربة الأصلية، وآلية بديلة تعزز من خلالها الأغشية الحيوية نمو النبات من خلال المكافحة الحيوية للكائنات المرضية (Innerebner et al., 2011)، مثل الاستعمار التنافسي للمحيط الجذري وإنتاج المركبات المضادة للميكروبات.

وتحتوي الدراسات على أمثلة عدة على نشاط PGPR للأغشية الحيوية، وأظهرت الأغشية الحيوية أحادية وثنائية الأنواع المنتجة من Pseudomonas وTrichoderma وBradyrhizobium وPenicillium إنتاجًا أكبر من الأمونيا وإنتاج IAA وإذابة الفوسفات وإنتاج حامض الحديد ونشاط النيتروجينيز من اللقاح العوالق، وعلاوة على ذلك، فعند استخدام الأغشية الحيوية لتلقيح البذور، تزداد عملية إنبات بذور القطن، وتزداد جذور القمح وطول النبتة، وزادت أوزان فول الصويا الجافة وتراكم النيتروجين، وإنبات بذور الذرة وطول الجذر مقارنة بالنباتات الملقحة بالخلايا العوالق(Mohd and Ahmad 2014).

التطبيقات الزراعية لبكتيريا المحيط الجذري

يمكن أن تكون البكتيريا ذات الخصائص المتعددة مفيدة في الزراعة التجارية وذات صلة بالاقتصاد الحيوي، وتتم زراعة كثير من النباتات ذات الأهمية الاقتصادية في الزراعة الأحادية، وتتطلب تعديلات للنمو والإنتاج الأمثل، إضافة إلى الحماية من الكائنات الحية الدقيقة المرضية، ومن الجدير بالذكر أنه يستخدم Biochar أو الفحم لتعزيز نمو بكتيريا المحيط الجذري في التربة، وهو الفحم المستخدم بوصفه بديلًا للتربة لكل من الكربون والفوائد الأخرى للتربة، فقد تلقى Biochar الكثير من الاهتمام في الأبحاث العلمية على مدار العقد الماضي، بوصفه تعديلًا للتربة؛ نظرًا لقدرته على تحسين خصوبة التربة وزيادة إنتاج المحاصيل، ويمكن للفحم الحيوي تغيير معايير خصوبة التربة

التي تؤثر في بقاء الميكروبات في التربة، بما في ذلك الرقم الهيدروجيني، ومحتوى المادة العضوية، وقدرة التبادل الكاتيوني والاحتفاظ بالمغذيات، واحتباس الماء وتوفير الأوكسجين، والكثافة الظاهرية، وتوفير مساحات مناسبة للميكروبات (Jenkins et al., 2017)، وقد بحثت الدراسات الحديثة أيضًا في استخدام الفحم الحيوي بوصفه مواد حاملة للتلقيح الميكروبي، حيث يتم استخدامه طلاءً للبذور، ويشكل بديلًا مستدامًا للتلقيح القائم على البقايا والمخلفات، ويعزز الاستعمار المبكر لجذور الغلاف الحيوي بالكائنات الحية الدقيقة المفيدة (Nadeem et al., 2017; Vecstaudza et al., 2017)، ومن المهم أن نلاحظ، مع ذلك أنه ليست كل مواد Biochar هي نفسها؛ حيث تؤثر ظروف إنتاج الفحم الحيوي ومكونات المواد الأولية تأثيرًا كبيرًا في الخصائص البيولوجية والكيميائية والفيزيائية لمادة الفحم الحيوي النهائية، وبينما يوفر الكثير منها تأثيرات مرغوبة في خصوبة التربة، يمكن أن يكون بعضها سامًّا للكائنات الحية الدقيقة أو النباتات (Wang et al., 2017)، ويُشتق الوقود الحيوي من الكتلة الحيوية غير الغذائية، غالبًا مادة lignocellulosic، إضافة إلى ذلك، هناك حاجة إلى تحسين توافر الكتلة الحيوية من محاصيل الكتلة الحيوية المزروعة لهذا الغرض، حيث يمكن تحسين نمو وإنتاجية محاصيل الوقود الحيوي المزروعة من خلال التلقيح بـ PGPR، ويمكن استخدام الأراضي الهامشية والملوثة لزراعة محاصيل الوقود الحيوي من أجل تجنب النزاعات حول الغذاء مقابل محاصيل الطاقة، وباستخدام PGPR التي تحتوي على إمكانات طبيعية للتعامل مع ملوثات التربة، يمكن استخدام محاصيل الوقود الحيوي بكفاءة للمعالجة النباتية وأيضًا لتقليل المستويات العالية من مخلفات الكيماويات الزراعية في الأراضي الزراعية (Evangelou and Deram, 2014).

ويمكن تلخيص أبرز التطبيقات الزراعية لبكتيريا المحيط الجذري في الأمرين الآتيين:

1. زيادة المحصول وتقليل تكاليف الأسمدة.

استخدام الاتحادات البكتيرية له تأثيرات غير متسقة في إنتاج المحاصيل، ويؤدي خلط بكتيريا *B. amyloliquefaciens* مع فطر *Trichoderma virens* إلى تحسين إنتاجية الذرة والطماطم من بين محاصيل أخرى (Akladious and Abbas 2012)، وتجمع بعض الشركات الزراعية بين Trichoderma وBradyrhizobium لتحسين نمو فول الصويا، بينما البعض قد يجمع بين الفطريات الجذرية الحويصلية وTrichoderma لتحسين النمو وعلاج مسببات الأمراض الموجودة في التربة.

والتلقيح ببكتيريا تثبيت النيتروجين الجوي Azospirillum وAzobacter أنتج سمادًا نيتروجينيًّا بمعدل النصف وزيادة في محصول بذور السمسم وجودة الزيت (Shakeri et al. 2016)، وعند تلقيح Brassica carinata ببكتيريا Azospirillum vinelandii أظهرت النتائج نفسها (Nosheen et al., 2016a,b)، وقلل اتحاد البكتيريا Bacillus cereus وBacillus subtilis

وSerrati asp من حدوث نيماتودا عقدة الجذر في الطماطم، وزيادة محصول الثمار (31.5 إلى 39%) والجودة (السكريات القابلة للذوبان، وفيتامين C، والأحماض القابلة للمعايرة)) (Niu et .al., 2016

2. تحسين مكافحة الأمراض وتقليل استخدام الكيماويات الزراعية.

تُعدّ العوامل البيولوجية طريقة بديلة لمكافحة مسببات الأمراض النباتية، وهناك أمثلة متاحة تجاريًّا، وقد تفرز البكتيريا الجذرية المفيدة المضادات الحيوية والمركبات الأخرى المضادة لمسببات الأمراض النباتية، ويُعدّ إنتاج المضادات الحيوية من أكثر آليات المكافحة الحيوية شيوعًا.

وتوجد أمثلة متاحة تجاريًّا لعوامل المكافحة الحيوية (Velivelli et al. 2014)، وغالبًا ما تطور مسببات الأمراض مقاومة للمضادات الحيوية وآليات المكافحة الحيوية الأخرى، بحيث لا يمكن السيطرة عليها بشكل كامل على المدى الطويل، ومن المحتمل أن يكون النهج الشامل مع طرق التحكم المتعددة أفضل من الاعتماد المفرط على حل واحد عند مواجهة مسببات الأمراض، وعلى المدى الطويل، ستطور البكتيريا المسببة للأمراض المضادة أيضًا طريقة عملها لمواجهة مسببات الأمراض، وينتج PGPR أيضًا المضادات الحيوية مثل الببتيدات الدهنية، والبوليكيتيدات، والأيضات المضادة للفطريات التي تثبط مسببات الأمراض (Prashar et al.، 2013).

لقاح PGPR الحي

لتطوير لقاح سلالة واحدة، لا بد من البدء بعزل الكائنات الحية الدقيقة من النباتات، ويتم تحقيق ذلك من خلال أخذ عينات واسعة من النباتات من مجموعة من الأماكن والأوساط البيئية (الزراعية، والجافة، والرطبة، والباردة، والساخنة، والمالحة)، وتركز الجهود حاليًّا بشكل أكبر على المحيط الجذري؛ نظرًا لأنه يحتوي على أكبر تنوع ميكروبي، وبمجرد عزل السلالات القابلة للزراعة، يمكن فحصها لمعرفة قدرتها على تعزيز إنبات المحاصيل الزراعية.

ويمكن بعد ذلك فحص العزلات الواعدة للتحقق من قدرتها على تسريع الظهور والنمو المبكر للنبات، في ظل ظروف بيئية خاضعة للرقابة، ويجب إجراء تجارب الإنبات والنمو المبكر للنبات في ظل ظروف نمو النبات المثلى والقاسية، وبشكل عام، أسهل ضغوط يتم تطبيقها بشكل موحد هي الإجهاد الملحي، وتمثل استجابات الإجهاد الملحي بشكل عام الاستجابات المتوقعة للضغوط الأخرى .(Subramanian et al., 2016a,b)

ومع ذلك، إذا كان جزيء الإشارة المسؤول عن التأثيرات في نمو النبات عبارة عن بروتين، فإن الظروف الملحية قد تفسد صحته، ما يجعله غير فعال؛ وهذا هو السبب في ضرورة إجراء التجارب أيضًا في ظل الظروف المثلى وغيرها من الظروف المجهدة، إذا سمح الوقت والموارد، ويمكن بعد

ذلك تقييم PGPR الواعد في ظل ظروف الحقل الأكثر تعقيدًا وتطلبًا لاختيار السلالات الأفضل أداءً للتسويق.

وعند فحص السلالات التي تتحكم في الأمراض يمكن استخدام فحوصات لوحة بتري لاختبار نشاط المكافحة الحيوية ضد مسببات الأمراض النباتية الشائعة، ويتم تلقيح سلالة المرض على أجار دكستروز البطاطس (PDA)، ويتم تلقيح سلالة PGPR على قرص من ورق الترشيح؛ لتحديد منطقة التثبيط أو القتل حول القرص(Takishita et al., 2018)، ويمكن التحقق من صحة النتائج بشكل عام، ثم في ظل ظروف خاضعة للرقابة وفي نهاية المطاف في ظل الظروف الحقلية.

ومن الواضح أنه سيتم استبعادها عن بعض السلالات بهذا النهج، ولن تكون جميع سلالات PGPR قابلة للزراعة، إضافة إلى ذلك، قد تكون هناك سلالات لا تظهر نتائج واعدة في المراحل المبكرة (على سبيل المثال لا تؤثر في الإنبات) ولكنها ستعزز النمو اللاحق، ومع ذلك نظرًا للعدد الكبير من السلالات التي يجب تقييمها في هذه المرحلة، يجب علينا قبول هذا الخطر والنظر في إعادة النظر في الموقف بمجرد اكتمال فحص المرحلة الأولية.

ثانيًا: الفطريات الجذرية Mycorrhizae

تُوجَد الفطريات الجذرية Mycorrhizae في التربة، وتكثر في المحيط الجذري Rhizospher وتسمى الفطريات التكافلية Symbiotic Fungi، وهناك ما بين 5000 إلى 6000 نوع من الفطريات التي تُكوِّن علاقات تكافلية مع جذور النباتات وأكثر من 20000 نوع من الفطريات التي تُكوِّن علاقات تكافلية مع بعض أنواع الطحالب في الأشنات Lichens، وأعداد أخرى من الفطريات تُكوِّن علاقات تكافلية مع كائنات حية أخرى تعيش معها في وسط بيئي مشترك (Sheth & Taga 2017, Valerio et. al. 2009).

مصطلح Mycorrhizae هو مصطلح يوناني مشتق من Myco = Fungus وrhiza = root، وهي الفطريات التي تُكوِّن علاقات تكافلية مع جذور معظم النباتات، ونحو 90% من نباتات الأرض حول العالم تُكوِّن فطريات جذرية، وقد وضع العالمGerdemann في عام 1968م قائمة بأسماء العوائل النباتية التي لا تُكوِّن أو نادرًا ما تُكوِّن فطريات جذور التي تبلغ أعدادها نحو 14 عائلة نباتية فقط؛ أي نحو 10% من النباتات فقط (Schroeckh et. al. 2009, Whittaker 1969).

ويبلغ عدد الفطريات الجذرية ما بين 5.000 و6.000 نوع من عشرات الآلاف من أنواع الفطريات؛ أي نحو 10% فقط من الفطريات، وهي من الفطريات اللاقحية Zygomycotina والفطريات الكيسية (الزقية) Ascomycotina والفطريات البازيدية Basidiomycotina وعدد قليل من الفطريات الناقصة Deuteromycotina.

وسوف نتطرق فيما يأتي من هذا الفصل لوصف خصوصية النبات المضيف للكائنات الحية الدقيقة في التربة في المحيط الفطري للأشجار، والإشارات التي ينطوي عليها إنشاء هذه التفاعلات البينية، وتأثيرها في تدفق التربة وعزلها، مع التركيز على التفاعلات داخل منطقة وجود الفطريات في المحيط الجذري mycorrhizosphere، حيث إن هذا هو الموقع النشط لإفرازات الجذور، وتدوير المغذيات، وامتصاص المغذيات النباتية، وتشير الضخامة المكانية للمنطقة الإحيائية للفطريات في الغابات إلى قدرتها على عزل كميات كبيرة من الكربون تحت الأرض، ويُعدّ فهم الضوابط على تخصيص الكربون في التربة، وحركة ذلك الكربون في جميع أنحاء بيئة التربة فجوة معرفية حيوية.

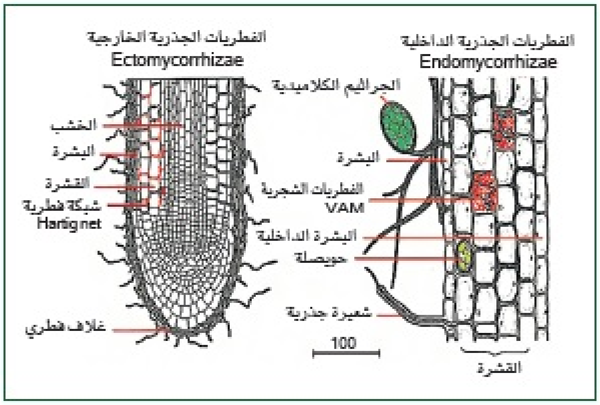
وتُوجَد مجاميع الفطريات الجذرية Mycorrhizae في كل مكان، وتشكل مكونًا أساسيًّا من الكتلة الحيوية الميكروبية في النظم البيئية للغابات والحقول الزراعية، وتمثل تدفقات الكربون إلى هذه الكائنات الحية الدقيقة الموجودة تحت الأرض جزءًا كبيرًا من الكربون الذي تمتصه النباتات، والتغير في الظروف المناخية يؤدي إلى تغيير في الكربون المخصص للنباتات الموجودة تحت الأرض، ما قد يتسبب في حدوث تحولات تركيبية في المجتمعات الميكروبية في التربة، وهذا التغيير المجتمعي سيؤثر في تركيز الكربون في النظم البيئية للتربة، وقد تم التعرف إلى نحو 10000 نوع من الفطريات Ectomycorrhizal، وبعضها خاص بالعائل ولن يرتبط إلا بنوع شجرة واحد، فعلى سبيل المثال Suillus grevillei مع الصنوبر، وتُعدّ الفطريات الجذرية حوضًا رئيسًا للكربون النباتي، ويمكن أن تؤثر الاختلافات في تشريح Mycorrhizae، وخاصة وجود ومدى انبعاث الخيوط، في كمية الكربون النباتي المخصص لهذه التجمعات، ولا يؤثر تشكل الخيوط الفطرية الجذرية في التوزيع المكاني للكربون في الغابات فحسب، بل يؤثر أيضًا في الاختلافات في طول عمر هذه الهياكل المتنوعة، وقد يكون لها عواقب مهمة على عزل الكربون C في التربة، ومن خلال التقنيات الجينومية الجديدة New genomic techniques يمكن فهم الآليات التي تنطوي عليها خصوصية واختيار ارتباطات الجذور الخارجية على الرغم من أنه لا يُعرَف الكثير عن الارتباطات الفطرية الجذرية، وتبرز ضخامة المنطقة الأحيائية للجذور الفطرية في النظم البيئية وقدرتها على عزل كميات كبيرة من الكربون تحت الأرض الأهمية الحيوية لزيادة معرفتنا بديناميكيات المجموعات الوظيفية المختلفة للجذر الفطري في البيئات المتنوعة.

وتُعدّ المادة العضوية في التربة Soil Organic Matter(SOM) أكبر تجمع للكربون (C) في النظم البيئية الأرضية، وهي أكبر من كربون الكتلة الحيوية الأرضية والغلاف الجوي معًا (Jobbágy and Jackson 2000)، ويدخل الكربون إلى تجمع SOM عن طريق البقايا النباتية: الأوراق، والجذور الخشنة والناعمة، والأغصان، والحطام الخشبي، وإفرازات الجذور، ونسبة الكربون التي تم تركيبها ضوئيًّا المخصصة للأوراق والتخزين والتمثيل الغذائي وإفرازات الجذور لها تأثيرات مهمة في تخزين الكربون في التربة.

وتختلف بحسب البيئة ونوع النبات وعمر النبات والمتكافلات الميكروبية وتوافر المغذيات (Epron et al., 2012). ومن المعروف أن كمية الكربون في التربة يصعب قياسها، وتختلف اعتمادًا على التنوع البيئي للمكونات الحية تحت الأرض، وتجمع الكائنات الحية الدقيقة في منطقة الجذور والظروف البيئية، وقد أظهرت دراسة (Clemmensen et al., 2013) أن 50-70% من الكربون المخزن في التربة مشتق من الجذور أو من الكائنات الحية الدقيقة المرتبطة بالجذور، وأن تراكم مادة الدبال Humus في الغابات يُنظَّم بشكل أساسي عن طريق تخصيص الكربون للجذور والخيوط الفطرية المرتبطة به بدلًا من تحلل البقايا بواسطة المترممات Saprophytes. ونتيجة لذلك، بدأت الدراسات في التركيز على القياس الكمي ليس فقط لتخصيص الكربون تحت الأرض، ولكن أيضًا التوزيع المكاني والزماني لهذا الكربون، وكيف يتأثر بالفطريات الجذرية Mycorrhizae المرتبطة بالجذور.

وتشكل 90% من النباتات الوعائية Vascular Plants علاقات تكافلية مع الفطريات الجذرية (Smith and Read 2008)، ويمكن تقسيم الفطريات الجذرية إلى مجموعتين رئيستين هما: مجموعة الفطريات الجذرية الداخلية Endomycorrhizae، التي تخترق خيوطها الفطرية الخلايا الجذرية للنبات، ومجموعة الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae، التي لا تخترق خلايا جذور النبات (الشكل 7-3).

وهناك أنواع عدة من الفطريات الجذرية الداخلية، بما في ذلك Ericoid, Arbutoid, Monotropoid, Orchid، والأكثر انتشارًا Arbuscular بين الفطريات الجذرية، حيث تحدث في نحو 85% من الأنواع النباتية ((Smith and Read 2008، وتُكوَّن الفطريات الشجرية Arbuscular mycorrhizae (AM) بشكل عام من فطريات الغلوميروميكوتية Glomeromycota (التي حلت محل الفطريات الزيجوتية Zygomycota في التصنيف الحديث)، وتشكل حويصلات أو تفرعات شجيرية بعد غزو أغشية الخلايا الجذرية، وعادة ما تُكوَّن الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae (ECM) من الفطريات البازيدية Basidiomycetes، والفطريات الكيسية Ascomycetes، والفطريات الزيجوتية Zygomycetes، وتحدث في 10% من الأنواع النباتية (معظمها الأشجار والنباتات الخشبية)، وتُنشئ الفطريات الجذرية الخارجية غلافًا خيطيًّا يغطي طرف الجذر، وتُشكِّل شبكة Hartig داخل قشرة الجذر، وتحيط بخلايا الجذر، وعلى الرغم من أن الفطريات والبكتيريا المترممة هما المحلِّلات الأولية في التربة، إلا أن اكتساب النبات للمغذيات المطلق، مثل النيتروجين، والفسفور، والبوتاسيوم، يتحقق من خلال علاقاتها التكافلية مع الفطريات الجذرية (Talbot et al., 2008).


الفطريات الجذرية الخارجية
Ectomycorrhizae
الخشب
البشرة
القشرة
شبكة فطرية
Hartig net
غلاف فطري
الفطريات الجذرية الداخلية
Endomycorrhizae
الجراثيم الكلاميدية
البشرة
الفطريات الشجرية
VAM
البشرة الداخلية
حويصلة
شعيرة جذرية
100
القشرة

الشكل (7-3): أماكن وجود الفطريات الجذرية الخارجية والداخلية في جذر النبات.

وتشارك الفطريات الجذرية في عدد من عمليات التربة المهمة بما في ذلك: حركة المغذيات المعدنية، ودورات المعادن، والمشاركة في استجابات النبات للإجهاد البيئي، والتفاعل مع بكتيريا التربة، وتتميز الفطريات الجذرية الخارجية بقدرات أنزيمية واسعة، يمكن أن تحلل المادة العضوية في التربة القابلة للتغير والمقاومة، ويمكن للبعض أن يشارك في عملية الأكسدة والاختزال وتدوير النيتروجين العضوي، وهذا يسمح للفطريات الجذرية بنقل كميات كبيرة من النيتروجين مباشرة إلى النباتات المضيفة (Hobbie and Hobbie 2006)، ولا يُعتقَد أن القدرات الأنزيمية للفطريات الجذرية الشجرية Arbuscular mycorrhizae واسعة مثل الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae (ECM)، ويمكن للفطريات الجذرية الشجيرية فقط نقل كميات صغيرة من النيتروجين إلى مضيفيها، عندما تكون مستويات التربة من النيتروجين عالية (Reynolds et al., 2005)، وتتصل الفطريات الجذرية الشجرية بشكل أساسي إلى مصادر النيتروجين غير العضوية (Fellbaum et al. 2012) على الرغم من أن امتصاص النيتروجين العضوي بواسطة الفطريات الجذرية الشجرية Arbuscular mycorrhizae قد تم إثباته في الغابات الشمالية (Whiteside et al. 2012)، ومع ذلك، يمكن أن تنقل الفطريات الجذرية الشجرية كميات كبيرة من الفسفور إلى مضيفها النباتي، إما عن طريق التحلل المائي للفسفور العضوي من أطراف الخيوط الفطرية، ثم النقل اللاحق إلى الشجرة عبر التفرعات الشجرية الداخلية arbuscules، أو عن طريق امتصاص وتحويل ونقل الفسفور غير العضوي على طول الخيط الفطري، وعلى الرغم من أن بعض أنواع النباتات يمكن أن تشكل علاقات تكافلية مع كل من الفطريات الجذرية الشجرية Arbuscular mycorrhizae والفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae، فإن هيمنة أو وجود أحدهما على الآخر سيغير توافر مغذيات الأشجار.

وهناك عشرة آلاف نوع فطري من الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae معروف أنها مرتبطة بما يصل إلى ثمانية آلاف نوع نباتي مختلف (Taylor and Alexander 2005)،

وتختار أنواع الأشجار الفطريات والكائنات الحية الدقيقة التي تعيش بحرية من خلال نضح إشارات كيميائية Chemical Signals مميزة في منطقة الجذور (المنطقة المحيطة بالجذر التي تتأثر بشكل مباشر بإفرازات الجذور)، وستؤدي الإفرازات المحددة إلى التعبير عن جينات الفطريات، التي ترتبط ببدء نمو القفص تجاه جذور النبات (Martin et al. 2007, Podila et al. 2009)، وإضافة إلى ذلك، هناك أدلة متزايدة على أن الاختلافات المجتمعية بين الأشجار والأنواع والجذور هي نتيجة (اختيار) الأشجار لميكروبات معينة من خلال الإفرازات الجذرية، وتطلق النباتات أنواعًا عدة من إفرازات الجذور بما في ذلك: الصمغ الذي يحافظ على بيئة رطوبة ثابتة، ومركات المعادن التي تنقل الحديد والزنك، وأشكال مختلفة من الكربون تتكون من الكربوهيدرات، والأحماض الأمينية، والأحماض الأليفاتية والعطرية منخفضة الوزن الجزيئي، والأحماض الدهنية والأنزيمات والهرمونات (Grayston et al. 1997)، وسيختلف تكوين وكمية إفرازات الجذر اعتمادًا على أنواع الأشجار، وسيتم أيضًا تعديلها ضمن أنواع الأشجار المعينة بناءً على الأنواع الفطرية التي تستعمر جذور الأشجار، ويمكن أن تزيد الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae المختلفة من إفراز الجذور للحمض العضوي، ويمكن أن تغير تركيبة الأحماض العضوية مقارنة بالأشجار غير الفطرية، ويرجع الاختلاف جزئيًا في كميات الكربون المخصصة للفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae والفطريات الجذرية الشجرية Arbuscular mycorrhizae، ومن ثم إفرازاتهما، إلى النضح الخيطي من مورفولوجيا الفطريات الجذرية، وهذه الإفرازات الخيطية تُوجِد مساحة أكبر من الكتلة الحيوية الميكروبية والنشاط الحيوي، يُطلق عليها اسم الغلاف الفطري (المنطقة المحيطة بطرف الجذر الفطري) أو فطريات المحيط الجذري mycorrhizosphere. وعلى الرغم من أن البكتيريا والأوليات موجودة في كل مكان في منطقة الجذور والغلاف الفطري، إلا أن دورها في عمليات النظام البيئي بدأ للتو في الفهم.

المنطقة الحيوية لفطريات المحيط الجذري
The Mycorrhizosphere Biome

خصوصية الأشجار الفطرية

كثير من أنواع أشجار الغابات المعتدلة لها روابط بالفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae بما في ذلك أشجار الصنوبر Pine، والتنوب Spruce، والبتولا Birch، بينما تحتوي بعض الأنواع على ارتباطات بالفطريات الجذرية الشجرية Arbuscular mycorrhizae مثل أشجار الأرز Cedar والقيقب Maple، وبعضها يحتوي على كليهما معًا، ومنها على سبيل المثال أشجار ألدر Alder، والحور Poplar)، وبعض أنواع الأشجار لديها قابلية عالية للفطريات مثل تنوب دوغلاس Douglas fir الذي يرتبط بأكثر من 2000 نوع من الفطريات الجذرية الخارجية المعروفة، في حين أن أنواع الأشجار الأخرى لديها قابلية فطرية ضيقة مثل ألدر Alder التي ترتبط فقط بـخمسين نوعًا من الفطريات الجذرية الخارجية المعروفة،

وتشير التقديرات إلى أن الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae يمكن أن تمثل ما يصل إلى 80% من المجتمع الفطري و30% من إجمالي الكتلة الحيوية الميكروبية في تربة الغابات , (Högberg and Högberg 2002 Wallander 2006).

ويمكن أن يؤثر وجود ووفرة وتزاحم أنواع نباتية معينة على تكوين ووظيفة المجتمع الميكروبي في التربة (Eisenhauer et al., 2010)، التي بدورها يمكن أن تؤثر في دورة المعادن في التربة ومحتوياتها من المغذيات، حيث تختلف الأنواع الفطرية في إستراتيجيات النمو والطلب على الكربون، وهناك دليل على الخصوصية في كثير من التفاعلات بين النبات والكائنات الحية الدقيقة، ما يشير إلى كل من الضغط الانتقائي القوي والمنافسة داخل المجتمع الحيوي لميكروبات المحيط الجذري (Podila et al. 2009). وهناك كثير من أنواع الفطريات الجذرية الخارجية لديها نطاق مضيف واسع مثل Lactarius، بينما بعضها مثل Suillus لديها نطاق مضيف ضيق، وتمت دراسة خصوصية الإشارة Signaling specificity بواسطة أنواع الأشجار المضيفة لإشراك الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae جيدًا، فعلى سبيل المثال، قد تمكّن الإشارات الكيميائية المتميزة (البروتينات الصغيرة المفرزة والهيدروفوبينات Hydrophobins) الأشجار مثل الحور Populus من تجنيد الفطريات الخارجية المفيدة من المجتمع الميكروبي في التربة (Podila et al. 2009). ومع ثورة التقنية الحيوية والهندسة الوراثية، يمكن القول: إن تسلسل الجينوم الكامل Whole-genome sequencing يساعد الآن على الحصول على فهم أعمق بكثير لمجموعة الجينات والإشارات المهمة المشاركة في الارتباطات التكافلية للفطريات الجذرية الخارجية، ومع ذلك، فقد بدأنا للتو في فهم العوامل التي تنطوي عليها الخصوصية والاختيار في الفطريات الجذرية الشجرية Arbuscular mycorrhizae المنتشرة في المحيط الجذري (Bonfante and Genre, 2010).

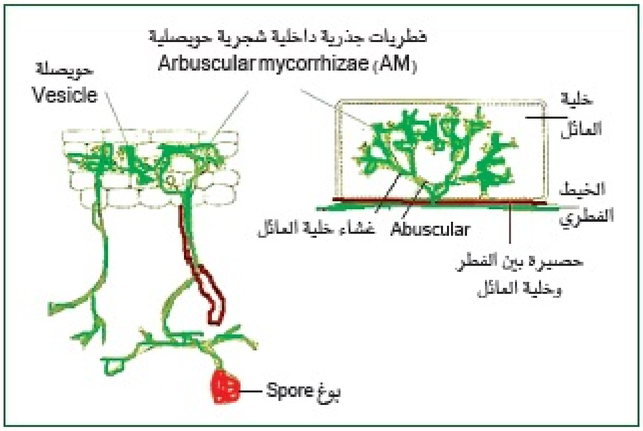
مورفولوجيا الفطريات الجذرية

قد يكون للتغيرات في إنتاج أنماط خيوط الغزل الفطري خارج النطاق وفي تباين أنواع الفطريات آثار في تدفق الكربون والعناصر الغذائية الأخرى في محلول التربة، وتختلف أصناف الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae في أنماط نمو خيوط الغزل الفطري خارج النطاق الخاصة بها نتيجة لإستراتيجياتها الغذائية المتنوعة (Agerer 2001) وقد يكون لهيمنة نوع مورفولوجي على الآخر تبعات على التوزيع المكاني لنواتج البناء الضوئي الحديثة في التربة، ويصف الباحث (2001 Agerer) تشريح الفطريات الجذرية الخارجية كالآتي: مستكشفات الاتصال أو التلامس Contact explorers، ومستكشفو المجموعة، ومستكشفو المسافات الطويلة، ومستكشفو المسافات المتوسطة، والمستكشفون لمسافات قصيرة، ومستكشفو الاتصال هم خيوط الغزل الفطري خارج النطاق مع عباءة ناعمة وعدد قليل من الخيوط الفطرية المنتشرة، التي غالبًا ما تكون أطرافها على اتصال وثيق بالأوراق الميتة. ومن أمثلة مستكشفي التلامس أنواع

Lactarius وRussula التي تنتج إفرازات عبر خيوطها الفطرية، ومستكشفو المجموعة هم خيوط الغزل الفطري خارج النطاق التي تنمو داخل الجذور (خيوط فطرية متوازية مجمعة يمكنها توصيل المغذيات على مسافات طويلة) أو عباءات وتنتج ممصات Haustoria في الخلايا القشرية للجذور، وإن استكشاف خيوط الغزل الفطري خارج النطاق لمسافات طويلة سلس مع أشكال جذرية متباينة للغاية، فعلى سبيل المثال، تُعدّ أنواع فطريات رتبة Boletales التابعة لطائفة Agaricomycetes مستكشفة مائية لمسافات طويلة، وتفرز فقط المركبات من أطرافها، ويمتلك المستكشفون لمسافات قصيرة غلافًا ضخمًا من خيوط منبثقة من دون تكوين شكل جذري Rhizomorphs.

وتتمتع الخيوط الفطرية Hyphae بالقدرة على نقل الكربون أفقيًا لمسافات طويلة تمتد إلى ما وراء جذور الأشجار، وعموديًا إلى أسفل طبقات التربة، وقد تم العثور على معظم الفطريات الجذرية الخارجية في طبقة التربة تحت السطحية (منطقة الأوراق شديدة التحلل) ولكن يمكن العثور عليها أيضًا في التربة المعدنية، بينما تفضل الفطريات الجذرية الخارجية الأخشاب المتحللة، وبعض أصناف الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae قادرة على تحرير المعادن من الصخور في التربة، بينما يحصل البعض الآخر على العناصر الغذائية من الحطام الخشبي الخشن، وتتمتع بعض الفطريات الجذرية الخارجية أيضًا بقدرات نمو رمية مثل Tomentella sp. ويُفترض أن هذه الفطريات قد تتحول إلى نمط حياة رمي Saprophytic عندما تصبح مادة التمثيل الضوئي الكربون نادرة، على سبيل المثال، خلال فصل الشتاء (Courty et al. 2008).

ولا تشكل الفطريات الجذرية الشجرية أشكالًا جذرية Rhizomorphs وتعتبر أن لديها خمسة أنواع بنائية متميزة، وتشمل هذه: شبكات العدوى Infection networks التي تنتجها الجراثيم وشظايا الجذور، وأنابيب جرثومية (بطول 20-30 مم فقط)، والجسور الخيطية التي تربط خيوطًا من نوع مغاير، وتشكل بقعًا من شبكات الوصلة الكثيفة بالقرب من منطقة الجذر، وأنواع خيوط تتوسع بسرعة عبر التربة أو على طول الجذور؛ بحثًا عن أجزاء جديدة من الجذور لتصيبها، وشبكات الخيوط الامتصاصية التي تستكشف مصفوفة التربة للمغذيات (Dodd et al. 2000) (الشكل 7-4)، ويمكن لشبكات الخيوط الامتصاصية أن تمتد من 4 إلى 7 سنتيمترات في التربة، ويمكن أن تحتوي كل شبكة على ما يصل إلى 8 أوامر تفريع، مع امتداد كل فرع نحو 5 ملم (Allen 2007).


فطريات جذرية داخلية شجرية حويصلية
Arbuscular mycorrhizae (AM)
حويصلة
Vesicle
خلية العائل
الخيط الفطري
غشاء خلية العائل
Abuscular
حصيرة بين الفطر وخلية العائل
Spore بوغ

الشكل (7-4): أماكن وجود الفطريات الجذرية الخارجية والداخلية في جذر النبات.

ويمكن أن تتشكل الواصلة الامتصاصية من خيوط مغايرة، ما يوسع النطاق المحتمل لامتصاص المغذيات إلى ما بعد 4-7 سنتيمترات، ومع ذلك، يمكن أن تمتد خيوط الغزل الفطري خارج النطاق لفطريات الجذور الخارجية إلى أبعد من الجذور نتيجة لتكوين الجذور، وتعيش جذور الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae، في المتوسط 11 شهرًا، ولكن لوحظ أنها تعيش مدة تصل إلى 7 سنوات (Treseder et al. 2005)، وفي المقابل تعيش خيوط الفطريات الجذرية الشجرية Arbuscular mycorrhizae في المتوسط 5-6 أيام فقط (Staddon et al. 2003)، ما يشير إلى أن الغابات التي تهيمن عليها الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae لديها إمكانات تخزين الكربون بشكل أكبر.

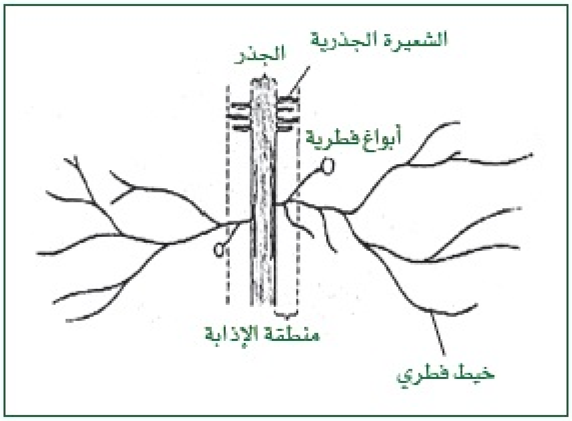
تدفق الكربون لفطريات المحيط الجذري

قد تكون الاختلافات في الفطريات المرتبطة بالجذور من حيث وجودها أو غيابها ونوع الارتباط الفطري مسؤولة عن التباين الكبير في معدلات الجذور إفرازاتها، وتميل معدلات النضح أو الإفراز من أطراف الجذر وأطراف الخيوط الفطرية إلى أن تكون أكبر في الجذور الدقيقة وفي الفطريات التي يتم تخصيصها بكربون أكثر (Phillips et al. 2011)، ويختلف تخصيص الكربون إلى خيوط الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae اعتمادًا على تصنيفها ومرحلة الاستعمار، فعلى سبيل المثال، يتم تخصيص المزيد من الكربون في التربة خلال المراحل المبكرة من الاستعمار، وحركة نواتج التمثيل الضوئي الحديثة داخل خيوط الغزل الفطري خارج النطاق ليست موحدة، وتختلف بحسب الأنواع الفطرية ومرحلة نموها، وقد وُجِد أن خيوط الفطريات الجذرية الخارجية كانت مواقع نشطة لنضح وإعادة امتصاص المركبات، مع تجمع قليل على طول الجذور، وإضافة إلى ذلك، أنه تم تخصيص المزيد من الكربون للأطراف الأمامية للخيوط التي احتلت نقطة غنية من المواد العضوية في التربة، وقد تتلقى أطراف جذر الفطريات الجذرية الخارجية المصابة 42 مرة من الكربون أكثر من أطراف الجذر غير المصابة في النبات نفسه

(Wu et al. 2002)؛ ولذلك سيكون هناك الكثير من التباين في توزيع إفرازات الجذور في التربة، اعتمادًا على توزيع الجذور وتوزيع الخيوط.

وقد يؤدي التوافر المتزايد لكربوهيدرات الجذر إلى تأثيرات تمهيدية إيجابية في تحلل المادة العضوية في التربة، وزيادة الكتلة الحيوية للمجتمع الميكروبي والنشاط على المدى القصير، وتم استخدام نسب النظائر المستقرة Stable-isotope ذات الوفرة الطبيعية مؤخرًا؛ للتحقق من عملية تدفق الكربون من الأشجار إلى المجتمع الميكروبي في التربة، وأظهر الباحث Epron et al. (2011م) أن هناك انتقالًا سريعًا لنواتج البناء الضوئي الحديثة إلى الغلاف الفطري من خشب الزان والبلوط والصنوبر خلال يوم إلى يومين، وأن أنماط تخصيص الكربون في التربة تتفاوت بشكل موسمي في الصنوبر والزان بحسب توزيع الأنواع، وبالمثل فإن الباحث Esperschütz et al. في عام (2009م) قام باستخدام CO213 ووجد أن الكربون في إفرازات جذر الزان تُستخدَم لأول مرة من قِبل البكتيريا سالبة الجرام والفطريات الجذرية، ولقد أظهر وضع العلامات بحقن جذوع الأشجار الناضجة أن نضح الكربون من شجرة التنوب في الحقل سريع، ويتم خلال 24 ساعة، وأن هذه الإفرازات تستخدمها الفطريات أولًا، ويمكن أن يكون مدى تأثير هذه الإفرازات على بعد 20 مترًا من القاعدة، وقد يكون جزئيًّا بسبب النقل عبر خيوط الغزل الفطري خارج النطاق (الشكل 7-5)، وعلى الرغم من أن هذه التقنيات شاقة جدًّا، بحيث لا يمكن قياس حركة الكربون في خيوط مفردة، إلا أنها تُظهر أن الكربون يمكن أن يتحرك لمسافات كبيرة بعيدًا عن قاعدة الشجرة، وتستخدمها الفطريات والبكتيريا في الجذور (Churchland et al., 2012).

ويعزز تخصيص الكربون إلى خيوط الفطريات الجذرية الدرجة التي يمكن أن تؤثر بها الشجرة في المجتمعات الميكروبية في التربة ودورة الكربون في التربة، وتختلف الأنماط المورفولوجية الفطرية المتباينة في التوزيع المكاني لهذا الكربون بشكل كبير، وإن التخصيص الأكبر من الكربون لفطريات الجذور، مقرونًا بأوقات دوران أبطأ لجذور الأشجار المرتبطة بالفطريات مقارنة بجذور النباتات غير الفطرية، يلمح إلى إمكانات المجتمعات الفطرية لزيادة عزل الكربون في التربة. ومع ذلك، قد تؤثر الاختلافات بين الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae والفطريات الجذرية الداخلية Arbuscular mycorrhizae في عزل كربون التربة، وتتمتع جذور Ectomycorrhizae بأوقات دوران أطول من Arbuscular mycorrhizae، وأدت التحسينات الأخيرة في وضع العلامات على النظائر المشعة وأساليب الفحص إلى فهم أفضل لكمية ونوعية الكربون المنبعث في التربة والديناميكيات المكانية والزمانية لتدفق الكربون في التربة. وإضافة إلى ذلك، يُظهر لنا تسلسل الجينوم الكامل مجموعة كبيرة من الجينات والإشارات المهمة المشاركة في الارتباطات التكافلية، ويجب أن تمكّن هذه التقنيات الجديدة من اتخاذ خطوات كبيرة في فهمنا لدور المجموعات الوظيفية المختلفة للجذر الفطري في دورة المعادن والكربون في التربة.



الشكل (7-5): أماكن وجود الفطريات الجذرية الخارجية والداخلية في جذر النبات.

إفرازات الجذر Root Exudates

يُعدّ توصيف نضح الجذور أمرًا صعبًا، ولكن التقنيات الجديدة تحمل إمكانية تحقيق ذلك، ومعظم الدراسات التي تميز الإفرازات الصادرة عن أنواع مختلفة من الأشجار كانت عبارة عن دراسات مصغرة أجريت على الشتلات في المختبر في ظل ظروف خاضعة للرقابة، إما في أنظمة الزراعة المائية أو الرملية، التي لا تصل إلى الأشجار والغابات الناضجة، وكانت هناك بعض الدراسات حول نضح جذر الأشجار في الحقل، وخاصةً على الشتلات الصغيرة باستخدام أطراف الجذر المحفورة، وفي الآونة الأخيرة (Shi et al. 2012) أظهر نظام غشاء تبادل الأنيون الذي أدى إلى تحسين جمع إفرازات الجذر في الموقع من أشجار الصنوبر المشعة التي يبلغ عمرها عامين، والتي تنمو في تربة Biotrons على نطاق واسع، ونظرًا لأن أغشية تبادل الأنيون هذه تمتص إفرازات الجذر بسرعة، فهناك فرصة ضئيلة للاستهلاك من قِبَل الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في تربة البيوترون، وقد تؤدي هذه التقنية إلى فهم أفضل لنضح الجذور من الأشجار الناضجة في الغابات.

ويمكن أن تتغير كمية الكربون المخصصة للجذور، والإفرازات الجذرية، والفطريات الجذرية، والكائنات الحية الدقيقة الأخرى في محيط الغلاف الجذري في ظل أنظمة المغذيات المختلفة، وتزيد في وجود كائنات دقيقة معينة، وتؤثر الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae في كل من كمية الكربون المخصصة لجذورها، والتركيب الكيميائي لتلك الإفرازات، وعلى الأرجح ستقوم الأشجار ذات الفطريات الجذرية الخارجية بتخصيص ثلث الكربون لجذورها أكثر من الأشجار عديمة الفطريات الجذرية الخارجية (Qu et al. 2004)؛ لأن خيوط الغزل الفطري خارج النطاق لديها طلب كبير على الكربون، وقد أظهرت الدراسات المخبرية أنه يمكن تخصيص ما يصل إلى 29% من الكربون المنتج في النبات إلى خيوط الغزل الفطري خارج النطاق، وتؤثر الظروف البيئية أيضًا في درجة استعمار الفطريات لجذور الأشجار، ومن المحتمل أن تتوسط في تدفقات الكربون في التربة (Meier et al. 2013)، فيمكن أن تختلف معدلات النضح النوعي للكتلة

Loblolly الصنوبر بأكثر من ثلاثة أوامر من حيث الحجم تحت تركيزات متغيرة من ثاني أكسيد الكربون، وقد لوحظت النباتات لتخصيص المزيد من الكربون لجذورها والمتعايشات الفطرية الجذرية في ظل ظروف فقيرة بالمغذيات، وفي الأنظمة غير المحدودة بالنيتروجيم، أو في الأنظمة التي تمت إضافة النيتروجين فيها، يمكن أن تنخفض الكتلة الحيوية الفطرية بنسبة تصل إلى 45%، ويرجع ذلك أساسًا إلى انخفاض تخصيص الكربون من الأشجار إلى الفطريات الجذرية (Phillips et al. 2011).

وتمثل إفرازات الجذور مدخلات شبه مستمرة من الكربون المتغير في التربة، على الرغم من اختلاف معدلات النضح في الزمان والمكان، بين الأنواع النباتية المتساقطة الأوراق والصنوبرية، على مدار المواسم وفي مختلف الظروف البيئية، والنباتات قادرة على التأثير ليس فقط في الكمية، ولكن أيضًا في تكوين الكربون المفرز من جذورها، ويُعتقَد أن هذا يؤدي دورًا في إشارات فطريات جذور الأشجار والخصوصية في منطقة الجذور، إضافة إلى إنتاج الأنزيمات والأحماض العضوية منخفضة الوزن الجزيئي والمركبات الأخرى التي تدعم المجتمعات الميكروبية في الغلاف الجذري، وتعمل إفرازات الجذور أيضًا على تعزيز توافر المغذيات عن طريق نقل المغذيات المعدنية ضعيفة الذوبان وتزويد ركائز الكربون التي تزيد من نشاط الكائنات الحية الدقيقة في منطقة الجذور وتدويرها، والتأثير في النهاية في تحلل المادة العضوية، ومعظم المعلومات حول طبيعة إفرازات الجذور وكيفية اختلافها بين أنواع الأشجار موجودة في الأنزيمات والأحماض العضوية منخفضة الوزن الجزيئي ومع الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae، وفي واحدة من الدراسات القليلة حول توصيف الكربوهيدرات، (Liebeke et al. 2009) أُستخدِم جهاز معروف باسم التحليل الكروماتوجرفي Gas-chromatograph-mass-spectrometer للكشف عن الاختلافات في محتوى السكر لمستخلصات التربة من تربة غابات مختلفة، ما يدل على أن تربة البلوط تحتوي على مانيتول Mannitol وتريهالوز Trehalose غير موجود في تربة الزان، وافترضوا أن الاختلاف في تركيزات السكر كان مسؤولًا عن الاختلافات في المجتمعات البكتيرية تحت هذه الأنواع من الأشجار، وهناك أدلة متزايدة على أن الأشجار يمكن أن تقيد بشكل فعال عملية تدفق الكربوهيدرات إلى المتكافلين معها من الفطريات الجذرية، ويتم ذلك من خلال التحكم في تصدير السكروز والتحلل المائي إذا كان الشريك الفطري لا يوفر مغذيات معدنية كافية (Nehls et al. 2010).

جزيئات إشارات الفطريات الجذرية

كثير من الإفرازات الجذرية والإفرازات الخيطية لديها القدرة على إحداث عدوى فطرية وتغيير بنية المجتمع الميكروبي في منطقة الجذور، وقد تم مؤخرًا إنشاء البروتينات المفرزة Secreted proteins، وتحديدًا فئة من البروتينات المفرزة تسمى المؤثرات Effectors، بوصفها جزيئات إشارات جذرية نباتية (Lowe and Howlett 2012)، وتعمل بروتينات جذور النبات المستجيب

على تسهيل العدوى عن طريق تعطيل المناعة أو إحداث استجابات دفاعية في النباتات (DeWit et al. 2009). وعلى سبيل المثال، وُجِد أن النوع *Laccaria bicolor* في أثناء استعماره للجذر يقوم بإفراز البروتين المؤثر Mycorrhizal-Induced Small Secreted Protein 7 (MISSP7)، وذلك استجابة للإشارات القابلة للانتشار المنبعثة من جذور النباتات، ويؤثر إفراز وامتصاص MISSP7 من قِبَل النبات عن طريق الالتقام الخلوي على كيمياء جدار الخلية، ما يسمح في النهاية باختراق الخيط الفطري لخلية الجذر، وMISSP7 هو البروتين الأكثر انتظامًا في أثناء عملية الفطريات الجذرية، ومن دون ذلك لا يحدث التعايش (Plett et al., 2011)، وبعد هذا الاكتشاف، ظهر بروتين فاعل آخر عرف باسم SP7، حيث وُجِد أن البروتين المؤثر SP7 تفرزه فطريات *Gigaspora interaradices* وهي من الفطريات الجذرية الشجرية Arbuscular mycorrhizae، ويتفاعل مع عامل النسخ المرتبط بأمراض النبات، ووُجِد أن SP7 يؤدي دورًا في إدارة تكوين التعايش مع جذور النباتات من خلال تعطيل نظام المناعة في النبات (Kloppholz et al. 2011)، ووُجِد أن النباتات أيضًا تعمل على زيادة إنتاج Strigolactones في ظل ظروف سوء التغذية، حيث لوحظ أن Strigolactones تحث على إنبات الأبواغ الفطرية، وتفرع الخيوط الفطرية، ما يدل على أن النباتات قد تبعث إشارات إلى الفطريات الجذرية القريبة لتعزيز العدوى، ولا يُعرَف الكثير عن إشارات الفطريات الجذرية الشجرية، على الرغم من أنه قد ظهر مؤخرًا أن فطريات Arbuscular mycorrhizae تنتج أيضًا إشارات نشطة قابلة للانتشار، مماثلة لعوامل تكوين العقد Nod التي تطلقها بكتيريا العقد الجذرية Rhizobia، وهذه الإشارات مطلوبة لتكوين الفطريات الجذرية (Bonfante and Requena 2011). وبالمثل، تم العثور على العوامل المؤثرة التي يفرزها النبات، والتي تؤثر في التفاعلات بين جذور النباتات والكائنات الحية الدقيقة التي تعيش بحرية (Hogenhout et al. 2009).

التعديلات على الإفرازات والإشارات

تقوم الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae والداخلية Arbuscular mycorrhizae بتعديل كمية وتركيب إفرازات الجذور، ما يؤثر في النضح في المحيط الجذري والفطريات الجذرية، ووُجِد أن خيوط الفطريات الجذرية الخارجية المتنامية تستخلص السكريات، والأحماض الأمينية، والببتيدات، والبروتينات، ومختلف الأحماض الأليفاتية والعطرية منخفضة الوزن الجزيئي LMWOA والأصباغ، وتختلف إفرازات الفطريات الجذرية الخارجية من حيث كمية وتركيب المواد المنبعثة، وبشكل عام يزيد وجود Ectomycorrhizae من إفراز الأحماض العضوية، ويغير نوع الحمض العضوي المنبعث.

وهناك بعض الأدلة على أن إفرازات الخيوط الفطرية تؤدي إلى مجتمعات بكتيرية معينة في الغلاف الجذري، والاقتراح بأن الأحماض العضوية تسهم في الانتقاء الميكروبي في منطقة الفطريات الجذرية (Nazir et al., 2010)، ويُعتقد أن الاختلافات في نضح الأحماض الأليفاتية

والعطرية منخفضة الوزن الجزيئي من خيوط الفطريات الجذرية الخارجية مسؤولة جزئيًّا عن اختيار مجتمعات ميكروبية معينة، ووُجِد زيادة في أعداد البكتيريا γ-proteobacteria عند استخلاص إفرازات الفطريات الجذرية الداخلية Arbuscular mycorrhizae، بما في ذلك الفورمات، والأسيتات، والجلوكوز، وسكريات Oligosaccharides.

ووُجِد أن هناك تأثيرًا لسكر Trehalose في عملية اختيار مجتمعات بكتيرية محددة في منطقة الفطريات الجذرية لكثير من أنواع الأشجار بما في ذلك التنوب، والصنوبر، والبلوط، وأُقترِح أن إطلاق سكر Trehalose بواسطة الفطر الجذري الخارجي Laccaria bicolor يمارس اختيارًا بوساطة المغذيات على البكتيريا المحيطة، وعلى وجه التحديد، تم العثور على أن لسكرTrehalose آثارًا معززة للنمو على البكتيريا *Pseudomonas monteilii* المساعدة للفطريات الجذرية Mycorrhization-Helper Bacteria (MHB)، عند تلقيحها بالفطر الجذري الخارجي Pisolithus albus في طبق التحليل (Duponnois and Kisa 2006) وتمّ إثبات أن سكر Trehalose الذي تم إطلاقه بواسطة الغزل الفطري للفطر *Laccaria bicolor* هو جاذب كيميائي للبكتيريا Pseudomonas، وفي الوقت الحالي، لم يتضح كيف ستؤثر مجتمعات الكائنات الحية الدقيقة في المحيط الجذري على قدرة الفطريات الجذرية Mycorrhizae في اكتساب المغذيات، ولكن من الواضح أن خصوصية النضح لديها القدرة على الاختيار للمجتمعات الميكروبية الخاصة بالأنواع.

الاختلاف المكاني والموسمي في تدفق كربون الجذور

يتنوع تدفق كربون الجذور من الناحية المكانية أسفل طبقات التربة وأفقيًّا مع التغيرات في توزيع الجذور والقنوات، ويتقلب تدفق الكربون أيضًا بشكل موسمي، ويختلف بين الأشجار المتنوعة، ويُوجَد في طبقات التربة تراكيب مجتمعية لتكوين المجتمع الميكروبي تتباين مع العمق بسبب انخفاض الكتلة الحيوية للجذور، وإفرازات الجذور، والكربون المتاح والتحول في تكوين المادة العضوية(Lejon et al. 2005).

وتوجد الفطريات عادةً في طبقات التربة العليا، حيث تتجمع المخلفات النباتية، ويتكون الدبال العضوي، وعلى النقيض من ذلك، فقد ثبت أن وفرة البكتيريا الخيطية actinomycete تزداد مع العمق، بينما يرتبط توزيع البكتيريا سالبة الجرام بتوزيع الجذور، ومع ذلك ترتبط معدلات تنفس التربة والنشاط الميكروبي بقربها من الأشجار وجذورها (Churchland et al., 2013)، وفي دراسة تخصيب ثاني أكسيد الكربون بالهواء الحر، (Phillips et al. 2008) أظهرت أنه يمكن التنبؤ بمعدلات النضح من خلال عدد الجذور والأطراف الدقيقة root tips للفطريات الجذرية (Pritchard et al. 2008b)، ويشير هذا إلى أنه يمكن نقل الكربون الشجري الحديث لمسافات

طويلة عبر الجذور والخيوط الفطرية، ما يدعم المجتمعات الميكروبية للكائنات الحية الدقيقة على بعد أمتار من قاعدة الشجرة.

وهناك تأثيرات موسمية وفسيولوجية مختلفة في تدفق كربون الجذور لأنواع الأشجار متساقطة الأوراق، وأظهر التحليل لديناميكيات التخصيص الكربوني في الأشجار، أن الأشجار عريضة الأوراق تكون معدلات نقل الكربون بها أعلى بمقدار عشر مرات من الأنواع الصنوبرية إبرية الأوراق، على الرغم من أن هذا يختلف باختلاف الموسم، ففي الربيع، تخصص الأوراق العريضة نسبة أكبر من الكربون لجذورها (Epron et al. 2012).

وتتباين الاتجاهات الموسمية في مجتمعات وأنشطة الكائنات الحية الدقيقة في التربة في المجموعة المتنوعة من النظم البيئية، بما في ذلك الغابات الصنوبرية والغابات المتساقطة الأوراق، ووجدت الدراسات التي تتناول الفطريات الجذرية الخارجية ECM على وجه التحديد أن بنية المجتمع، وكذلك القدرات الأنزيمية والتمثيل الغذائي، تظهر تباينًا زمنيًّا كبيرًا على مدار عام واحد (Courty et al. 2008).

ومن المحتمل أن يكون هذا مرتبطًا بالاختلافات في تدفق الكربون في التربة (Collignon et al. 2011)، ووُجِد أن الفطريات الجذرية الخارجية ECM تتنوع خلال موسم النمو في غابة متساقطة الأوراق مختلطة، وليس الفطريات الجذرية الداخلية AM، وأن كليهما كانا مرتبطين بأنشطة أنزيمية مختلفة تشارك في دورة المغذيات، وعلى وجه التحديد ارتبطت الفطريات الجذرية الداخلية AM مع أنزيم leucine aminopeptidase وأنزيم urease، وكلاهما من الأنزيمات المشاركة في اكتساب النيتروجين.

ولم يكن يُنظَر إلى الفطريات الجذرية الشجرية تقليديًّا على أنها قادرة على تزويد مضيفها بكميات كبيرة من النيتروجين، على الرغم من وجود دليل حديث على أن الفطريات الجذرية الداخلية AM يمكنها الوصول إلى مصادر كل من النيتروجين غير العضوي والنيتروجين العضوي في الغابات، وقد ارتبطت الفطريات الجذرية الخارجية ECM بمعظم الأنزيمات المقيسة المشاركة في اكتساب الكربون والنيتروجين، ولكن فقط خلال أواخر الصيف، ويشير هذا إلى أن قدرة الفطريات الجذرية على تحطيم الكربون المتمرّد وتزويد مضيفهم بالنيتروجين قد تختلف بشكل موسمي (Smith and Read 2008).

آثار تدفق كربون فطريات المحيط الجذري في الكائنات الحية الأخرى

Effects of Mycorrhizosphere C Flow on Other Organisms

من الواضح أن التباين في جودة وكمية الكربون المنطلق في إفرازات الجذور والنباتات التي تنتجها أنواع الأشجار المختلفة يمكن أن يؤدي إلى مجتمعات ميكروبية مختلفة من فطريات الجذور

والغلاف الجذري، وهذا يختلف بين أنواع الأشجار المرتبطة بالفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae والفطريات الجذرية الداخلية Arbuscular mycorrhizae، وإن أشجار الفطريات الجذرية الخارجية ECM لها تأثير جذري أكبر من أشجار الفطريات الجذرية الداخلية Arbuscular mycorrhizae، وارتبط حجم تأثيرات فطريات الغلاف الجذري سلبًا بدرجة الاستعمار الفطري في أنواع الأشجار المرتبطة بالفطريات الجذرية الداخلية Arbuscular mycorrhizae، ومع الكتلة الحيوية للجذور الدقيقة في أنواع الأشجار المرتبطة بالفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae.

ويشير هذا إلى أن العوامل المختلفة تؤثر على تأثيرات الغلاف الجذري في أنواع الأشجار التي تشكل مجتمعات فطريات Arbuscular mycorrhizae مقابل مجتمعات فطريات Ectomycorrhizae، وتدعم إفرازات الخيوط الفطرية من أطراف Ectomycorrhizae مجموعة متنوعة من البكتيريا والفطريات (Bomberg et al. 2011)، وتمكّننا طرق التسلسل عالية الإنتاجية التي تم تطويرها خلال السنوات الأخيرة من الحصول على دقة أكبر بكثير في علم التطور لدراساتنا عن المجتمعات الميكروبية في فطريات الغلاف الجذري، وعلى سبيل المثال في عام (2010) استخدم الباحث Kluber et al. تسلسل الحمض النووي لتحديد الأصناف المكونة لحصيرة الفطريات الجذرية الخارجية Ectomycorrhizae (أنواع *Hysterangium* و *Piloderma* و *Suillus* و *Russula*) في أسفل الغابة والأصناف المكونة للحصيرة الكارهة للماء (أنواع *Gomphus* و *Ramaria*) في التربة المعدنية في غابة التنوب.

ولقد عزز شكلا حصيرة Ectomycorrhizae من أنشطة الأنزيم، وتحديدًا الكيتينيز Chitinase والفوسفاتيز Phosphatase وأكسيداز الفينول Phenol oxidase مقارنة

بالأشكال غير الحصيرية في المواقع المجاورة (Kluber et al. 2010)، ولم يتم إثبات ما إذا كان نشاط الأنزيم المعزز في الحصائر ناتجًا عن Ectomycorrhizae نفسها أو البكتيريا والفطريات المميزة في فطريات المحيط الجذري، وفي المستقبل ينبغي إجراء المزيد من التحسينات على التقنيات الجزيئية، والتحليل المعلوماتي الحيوي المحسَّن، وتطوير طرق جديدة لاستنبات ودراسة هذه الكائنات التي تم الكشف عنها حديثًا، وذلك من شأنه أن يُمكِّن من توضيح الروابط بين هذه الكائنات ووظائفها.

وحتى الآن، استندت معظم معرفتنا حول دور الكائنات الحية الدقيقة المرتبطة في الفطريات الجذرية الخارجية بالغلاف الجذري Ectomycorrhizosphere إلى دراسات الكائنات المستزرعة، ويمكن أن يتراوح طيف العلاقات بين النبات والميكروبات في منطقة الجذور من التبادلية إلى المسببة للأمراض (Bais et al. 2006)، وتستفيد النباتات من بكتيريا المحيط الجذري المعززة لنمو النبات Plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) التي توجد في منطقة الجذور والغلاف

الفطري من خلال تكوين أغشية حيوية تحمي الجذر من مسببات الأمراض (Akhtar and Siddiqui 2009).

وإن بكتيريا المحيط الجذري المقاومة النظامية المكتسبة تحفز وتعزز نمو النبات، وهناك بعض الأدلة على التفاعلات التآزرية بين PGPR والفطريات الجذرية، التي قد تفيد النباتات نتيجة اكتساب المزيد من المغذيات، وتثبيط مسببات الأمراض النباتية وزيادة الفطريات (Artursson et al. 2006)، وهناك تفاعلات إيجابية بين Ectomycorrhizae والبكتيريا التي تؤدي إلى زيادة التجوية للمغذيات المعدنية، ما يؤدي في النهاية إلى زيادة امتصاص العناصر الغذائية من قِبَل النبات.

وقد تم العثور على الفطريات الجذرية الداخلية Arbuscular mycorrhizae أيضًا لتغيير بنية المجتمعات الميكروبية في mycorrhizosphere في التربة (Welc et al 2012)، وأظهر عزل وتحديد البكتيريا الجذرية الموجودة في فطريات المحيط الجذري حول خيوط Arbuscular mycorrhizae بكتيريا ذات خصائص معادية لمسببات الأمراض التي تنتقل عن طريق التربة، وخصائص مضادة للفطريات (على الرغم من أنها لا تؤثر في تكافل الفطريات الجذرية الداخلية Arbuscular mycorrhizae، وتتحسن قدرة تثبيت النيتروجين الجوي لبعض نباتات Arbuscular mycorrhizae عندما تكون الفطريات الجذرية موجودة مقابل عندما تكون غائبة (Lioussanne et al. 2010).

وتُعزَى تأثيرات الفطريات الأكبر إلى مجموعة محددة من بكتيريا المحيط الجذري المعززة لنمو النبات PGPR، وهي ما تسمى البكتيريا المساعدة الفطرية Mycorrhization-Helper Bacteria (MHB)، وتم التعرف إلى ثلاث مراحل حياة في الفطريات الجذرية، وهي الرمية التي تعيش معيشة حرة، ومرحلة ما قبل العدوى، ومرحلة التكافل Symbiotic.

وخلال (مرحلة العيش الحر) قبل الإصابة، يمكن أن تتفاعل الفطريات الجذرية مع بكتيريا معينة، مثل أنواع Pseudomonas التي يُعتقَد أنها تعزز إنشاء الفطريات الجذرية (Pivato et al., 2009)، ويمكن لهذه البكتيريا المساعدة أن تزيد من الاستعمار الفطري للنبات من 1.2 إلى 17.5 مرة (Frey-Klett et al. 2007). والبكتيريا المساعدة ليست خاصة بالنبات، ولكنها قد تكون خاصة بالفطريات، فعلى سبيل المثال تعزز البكتيريا *Pseudomonas fluorescens* من بقاء الفطر الجذري الخارجي Laccaria bicolour عندما يكون في مرحلة العيش الحر، ما يزيد من نمو الفطريات وكثافة الخيوط الفطرية وزاوية التفرع.

وتقوم البكتيريا المساعدة لفطريات المحيط الجذري بتغيير فسيولوجيا الفطريات من حالة التغذية الرمية التي تعيش بحرية إلى مرحلة (ما قبل التكافل) وفي أثناء عملية التكاثر الفطري، يمكن أن يؤدي انتشار البكتيريا إلى تحسين درجة تقبل الجذور (Aspray et al. 2006)، وتسريع إنبات

التكاثر الفطري في التربة، وزيادة إنتاج المركبات مثل Auxofurans التي ثبت أنها تؤثر في التمثيل الغذائي للفطريات والتعبير الجيني (Riedlinger et al. 2006).

السلالات البكتيرية المساعدة للفطريات التي تم تحديدها حتى الآن تشمل: بكتيريا بروتيوبكتيريا سالبة الجرام، وظواهر ثبات موجبة الجرام، وفطريات أكتينية موجبة الجرام، وتعمل معظم البكتيريا المساعدة MHB على زيادة الاستعمار الفطري للجذور من خلال تحفيز تمديد وتفرع الفطريات، وزيادة اتصالات أو استعمار فطريات الجذر، والتأثير في الظروف البيئية للتربة -Frey Klett et al., 2007))، وتم إثبات أن إطلاق عدد من المركبات المختلفة، بما في ذلك الغازات والنواتج الأيضية الثانوية على سبيل المثال Auxofuran، بواسطة MHB يزيد من نمو الفطريات (Keller et al., 2006)، ويُعتقَد أن البكتيريا المساعدة للنمو الفطري تقلل من إجهاد النبات والفطريات الجذرية عن طريق إزالة السموم من التربة، فعلى سبيل المثال المواد البوليفينولية Polyphenolic التي تنتجها *Paxillus involutus* سامة للفطر، ولكن يمكن تفكيكها بواسطة البكتيريا المساعدة MHB، علمًا أنه تم إثبات قدرة MHB على زيادة ودعم عدوى الفطريات الجذرية فقط في ظل الظروف المختبرية، ومع ذلك، كما في حالة PGPR، لا يُعرَف الكثير عن تأثير هذه البكتيريا في الفطريات الجذرية في الموقع.

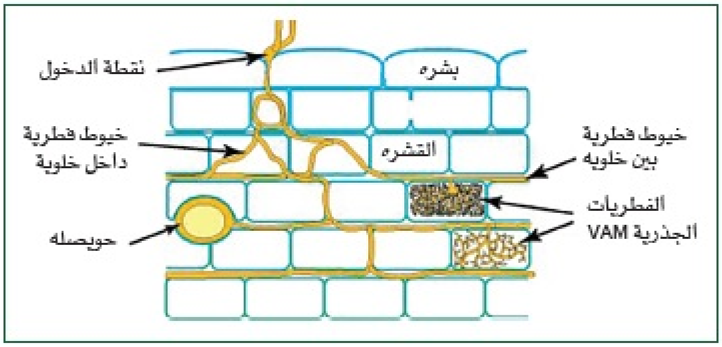
تقسيم الفطريات الجذرية

وتقسم الفطريات الجذرية إلى أربعة مجاميع رئيسة، وذلك بحسب تركيبها ومجاميع النباتات التي تكون معها العلاقات التكافلية كما في الجدول (7-1) والجدول (7-2):

فطريات الجذور الحويصلية الشجرية - mycorrhizae = VAM Vesicular arbuscular

يلاحظ في هذا النوع من الفطريات الجذرية أنها لا تُكوِّن غلاف No sheath-form، بل تكون ممصات Haustoria شجيرية Arbuscules ولفائف Coils، والخيوط الفطرية Hyphae تكون داخل خلوية Intracellular hyphae (الشكل 7-6)، وتكون الخيوط الفطرية غير مقسمة Non septated hyphae، ومدى العائل Host يشمل عددًا كبيرًا من أنواع النباتات الخضراء بما فيها السراخس، والحزازيات، وعاريات البذور، ومغطاة البذور، بينما مدى المتكافل Symbiont يشمل أربعة أنواع من الفطريات الزقية من الـ Endogonaceae: Glomus, Gigasopra, Sclerocysitis, Acaulospora.

وبالنسبة إلى التفاعلات الغذائية Nutritional interactions نجدها في العائل المغذيات المعدنية وخاصة الفسفور، وفي المتكافل الكربوهيدرات.



الشكل (6-7): اختراق الفطريات الجذرية الداخلية الشجرية الحويصلية لجذر النات.

2. فطريات الجذور الخارجية (المغلفة) Ectomycorrhizae = (sheathing mycorrhizae)

فطريات الجذور الخارجية تكون غلافًا أو حصيرة Form sheath or mantle والخيوط الفطرية تكون بين خلوية intercellular hyphae، ومدى العائل Host يشمل عددًا كبيرًا من الأشجار والشجيرات، بينما مدى المتكافل Symbiont يشمل عددًا كبيرًا من أنواع الفطريات تتضمن 25 عائلة من البازيدية وسبع عوائل من الفطريات الزقية وجنسًا من اللاقحية Endogone وبالنسبة إلى التفاعلات الغذائية Nutritional interactions نجدها في العائل المغذيات المعدنية، وفي المتكافل الكربوهيدرات.

3. فطريات الجذور الأرشيدية Orchid Mycorrhizae: septated fungi

سميت بالأرشيدية لأنها تكون علاقة تكافلية مع النباتات الأرشيدية، حيث إن هناك آلافًا من الأنواع تصل إلى نحو 17.500 نوع من النباتات الأرشيدية تكون علاقات تكافلية غالبًا Endomycorrhizae، ونحو ثلاثين نوعًا من فطر Rhizoctonia تكون علاقة مع الأراشد Endophytic، وفطريات الجذور الأرشيدية Orchid تُكوّن ممصات ولفائف أو كريات Form Haustoria and coils or pellets، ومدى العائل Host يشمل كل أفراد العائلة الأرشيدية Orchidaceae، بينما مدى المتكافل Symbiont يشمل عزلات عدة من الخيوط العقيمة مثل Rhizoctonia وثمانية أجناس من البازيدية بما فيها بعض الممرضة، وبالنسبة إلى التفاعلات الغذائية Nutritional interactions نجدها في العائل المغذيات المعدنية، وفي المتكافل فإن التفاعلات الغذائية غير معروفة حتى تاريخه.

4. فطريات الجذور الإريكانية Ericalean Mycorrhizae: septated fungi

وهذا النوع من فطريات الجذور يقسم إلى ثلاثة أقسام رئيسة هي:

أ. الإريكودية Ericoid mycorrhizae (Endomycorrhiza)

تكون ممصات ولفائف ومدى العائل Host يشمل أفرادًا من Ericales ذات الشعيرات الجذرية الدقيقة، بينما مدى المتكافل Symbiont يشمل عزلات عدة من العقيمة منها Hymenoscyphus & Oidiodendron من الفطريات الزقية، وبالنسبة إلى التفاعلات الغذائية Nutritional interactions نجدها في العائل المغذيات المعدنية، خاصة الأمونيا والنيتروجين، وفي المتكافل الكربوهيدرات.

ب. الأربيوتودية Arbutoid mycorrhizae (Ectendomycorrhizae)

تكون ممصات ولفائف وغلافًا وشبكة خاصة في نسيج البشرة، ومدى العائل Host يشمل أفرد الـ Ericales ذات الجذور القوية منها Arbutus، بينما مدى المتكافل Symbiont معظمها من الزقية التي تكون أيضًا خارجية Ectomycorrhizae، وبالنسبة إلى التفاعلات الغذائية Nutritional interactions نجدها في العائل المغذيات المعدنية، وفي المتكافل من المحتمل الكربوهيدرات.

ج. المونوتروبودية Monotropoid mycorrhizae = Ectendomycorrhizae

تكون ممصات Haustoria وغلافًا وأوتاد pegs وشبكة خاصة في نسيج البشرة، ومدى العائل Host يشمل أفراد الـ Ericales اللاخضرية منها Monotropa، بينما مدى المتكافل Symbiont.

معظمها من الفطريات الزقية التي تكون أيضًا خارجية Ectomycorrhizae، وبالنسبة إلتفاعلات الغذائية Nutritional interactions نجدها في العائل الكربوهيدرات والمغذيات المعدنية، وفي المتكافل غير معروفة.

جدول (7-1): التركيب والتفاعلات الغذائية لمجموعة الفطريات الجذرية

مجموعة الفطريات الجذرية	التركيب			التفاعلات الغذائية	
	غلاف	شبكة	ممصات	العائل	المتكافل
1. الحويصلية الشجرية	-	-	شجيرية ولفائف	المغذيات المعدنية كالفسفور	الكربوهيدرات
2. الخارجية	+	+	-	المغذيات المعدنية	الكربوهيدرات

3. الأرشيدية		-	-	+لفائف	العناصر المعدنية	غير معروف
	الإريكودية	-	-	+لفائف	المغذيات كالأمونيا والنيتروجين	الكربوهيدرات
4. الإريكانية	الأربيوتوية	+	+ في البشرة	+لفائف	المغذيات المعدنية	من المحتمل الكربوهيدرات
	المونوتروبية	+	+ في البشرة	+ أوتاد	الكربوهيدرات والمغذيات المعدنية	غير معروفة

جدول (2-7): مدى العائل Host و مدى المتكافل Symbiont لمجموعة الفطريات الجذرية

مجموعة الفطريات الجذرية	مدى العائل Host	مدى المتكافل Symbiont
1. الحويصلية الشجرية	عدد كبير من أنواع النباتات بما فيها السراخس والحزازيات وعاريات ومغطاة البذور.	أربعة أنواع من الفطريات الزقية من الـ Endogonaceae :*Glomus, Gigasopra , Sclerocysitis* ,*Acaulospora*.,
2. الخارجية	عدد كبير من الأشجار والشجيرات.	عدد كبير من أنواع الفطريات 25 عائلة من البازيدية وسبع عوائل من الزقية وجنس من اللاقحية Endogone.
3. الأرشيدية	كل أفراد العائلة الأرشيدية Orchidaceae.	عزلات عدة من الخيوط العقيمة مثل Rhizoctonia وثمانية أجناس من البازيدية بما فيها بعض الممرضة .

4. الإريكانية	الإريكودية	أفراد من Ericales ذات الشعيرات الجذرية الدقيقة.	عزلات عدة من العقيمة منها Oidiodendron & Hymenoscyphus من الزقية.
	الأربيوتوية	أفرد الـ Ericales ذات الجذور القوية منها Arbutus.	معظمها من الزقية التي تكون أيضًا خارجية Ectomycorrhizae.
	المونوتروبية	أفراد Ericales اللاخضرية منها Monotropa.	معظمها من الزقية التي تكون أيضًا خارجية Ectomycorrhizae.

العلاقة بين الفطر والنبات

تقوم العلاقة بين الفطر والنبات على أساس تبادل المنفعة من خلال العلاقة التكافلية التي تجمع الفطريات الجذرية مع النبات في محيط غذائي مشترك، ويمكن التفصيل في فوائد هذه العلاقة بين الشريكين من خلال تناول كل منهما على حدة كالآتي:

أولًا: مدى استفادة النبات من الفطريات الجذرية

من خلال الدراسات والتجارب الحقلية تبين أنه يمكن أن يستفيد النبات من فطريات الجذور بطرق عدة مختلفة، نذكر منها مثلًا أن فطريات الجذور:

1. تزيد من كمية العناصر الغذائية المتاحة، حيث تعمل على إذابة الفوسفور وأكسدة الكبريت وزيادة إتاحة النترات وزيادة نفاذية الجذور، وتزيد من امتصاص هذه العناصر.

2. إنتاج مضادات حيوية إلى خارج الخلية، وإنتاج الأنزيمات المحللة وحمض الهيدروسيانيد، وإنتاج منظمات النمو: الأوكسين، والجبريلين، والسيتوكاينين، والإيثيلين.

3. تزيد من مساحة السطوح الماصة للجذر، وذلك بزيادة عدد الجذور الجانبية وتفرع الجذور، وكذلك الخيوط الخارجية تزيد من مساحة سطح الامتصاص وتزيد من عمر الجذر.

4. تحمي الجذور من بعض الكائنات الممرضة من خلال استحثاث مقاومة النبات النظامية.

5. تزيد من مقاومة النبات للظروف البيئية المتطرفة مثل درجة الحرارة العالية والجفاف الشديد.

6. تزود النباتات بالأنزيمات والفيتامينات وبعض المواد المنظمة للنمو مثل الهرمونات التي تزيد من حجم الجذر، وتساعد هذه الفطريات على سرعة التعرق في الأجزاء المزروعة بواسطة القطع أو العقل.

7. تزيد من كمية الكلوروفيل، ومن ثم يزيد البناء الضوئي ونواتجه في النبات.

8. تزيد من قدرة النبات على تحمل سمية بعض المعادن الثقيلة مثل الزنك Zn والنحاس Cu.

ثانيًا: مدى استفادة الفطريات الجذرية من النبات

يقدم النبات للفطريات الجذرية كثيرًا من الفوائد، نذكر منها الآتي:

1. يقدم النبات خلايا الجذر من أجل نمو الفطر المستمر وتكوينه.

2. يزود الفطر بالمركبات الضرورية لنمو الفطر بما في ذلك الكربوهيدرات، والفيتامينات، ومنظمات النمو، ومواد أخرى غير معروفة.

3. يوفر النبات الجو المناسب لنمو وتكوين الفطر بما في ذلك الرقم الهيدروجيني المناسب في المحيط الجذري والعناصر المغذية غير العضوية.

نبات *notatum Paspalum* المزروع في تربة تحتوي على تركيز قليل جدًّا من الفسفور P زاد نموها من 200-1100% نتيجة لوجود الفطريات الجذرية، ونبات عشبة الجويدار ryegrass زاد نموها بنسبة 48% ونبات النفل white clover زاد نموها بنسبة 91% في تجارب أجريت في البيوت الزجاجية، وذلك بالنسبة إلى النباتات غير المصابة.

وفي تجربة أجريت في الحقل وُجِد أن نمو المجموع الخضري للنباتات التي حقنت بالفطريات الجذرية قد زاد بدرجة معنوية كبيرة مقارنة بتلك النباتات التي لم تعامل بشيء من الفطريات الجذرية (الشكل 7-6)، وإن النباتات الآتية قد زادت بنسب متفاوتة (الجدول 7-3 والجدول 7-4):

قد زاد بنسبة 77% للبصل onion و79% للبرسيم alfalfa و33% للشعير barley المحقونة بمخلوط من الفطريات الجذرية الداخلية بما فيها فطرة Glomus mosseae، بينما زاد نمو المجموع الخضري للنباتات نفسها المحقونة بفطرة الجذور Glomus caledonius فقط بنسبة 400% للبصل و600% للبرسيم و30% للشعير، وقد وُجِد أن جذور البصل المصابة بفطريات الجذور تمتص 4 أضعاف الفسفور P عن الجذور غير المصابة.

الجدول (7-3): تأثير الجذريات الفطرية في نمو وإنتاج بعض المحاصيل الزراعية

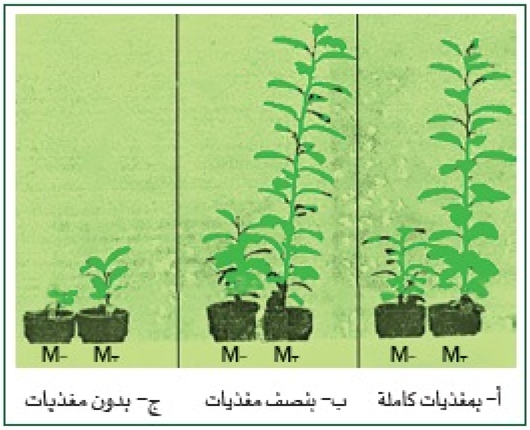
النبات	Glomus caledoninus	Glomus mosseae & Other
Alfalfa البرسيم	% 600	% 79
Onion البصل	% 400	% 77
Barley الشعير	% 30	% 33

جدول (7-4): تأثير حقن عدد من نباتات المحاصيل بفطريات جذور الـ VAM في تجارب حقلية.

المحصول	نوع الـ VAM	حالة التربة	طريقة الحقن	الزيادة في النمو	البلد
الشعير	*G. mosseae*	U	A	X 4	باكستان
الليمون	*Gi. calospora*	U	U	0	فلوريدا
الليمون	*G. fasciculatus*	F	D	X 1.7 -4	كاليفورنيا
الذرة	*G. mosseae*	U	A	X 2.3	باكستان
البصل	*G. caledonius*	U	C	X 6	بريطانيا
الخوخ	*G. fasciculatus*	F	C	X 1.8	كاليفورنيا
الغراء الحلو	*G. mosseae*	F	C	X52-84	جورجيا
القمح	*G. mosseae*	U	A	X 3	باكستان
البطاطس	*Indigenous*	U	B	X 1.2	بريطانيا
فول الصويا	*Gi. Calospora*	F	A	X1.5-0	فلوريدا

حالـــة U: تربة غير معقمة.

التربـة:	F: تربة مطهرة بالتبخير.
طريقة الحقن:	A: شتل النباتات المحقونة.
	B: وضع تربة حقل عالية الإصابة في مكان وضع البذور.
	C: وضع تربة مع الجذور من مزارع أصية في مكان وضع البذور.
	D: بذور ممزوجة باللقاح.
	X: ضعف الزيادة أو النقص بالنسبة إلى النباتات غير المحقونة.


M-
M+
M-
M+
M-
M+
أ- بمغذيات كاملة
ب- بنصف مغذيات
ج- بدون مغذيات

الشكل (7-6): تجربة توضح الفرق بين التلقيح بالفطريات الجذرية M+ وعدم التلقيح بالفطريات الجذرية M- على نمو النبات مع وجود أو غياب المغذيات: أ. النمو بمغذيات كاملة. ب. النمو بنصف مغذيات. ج. النمو من دون مغذيات.

التغذية المعدنية Mineral Nutrition

يتم انتقال الأيونات لكثير من المعادن والمركبات الغذائية من محلول التربة إلى داخل أنسجة النبات بإحدى طريقتين هما:

أ) بواسطة التدفق الجماعي (الكتلي) Mass flow.

ب) الانتشار Diffusion، وهذا يعتمد على مقدرة الأيون المعين للحركة Mobility

في التربة.

بعض الأيونات مثل النترات NO_3 والكبريتات SO_4 والكالسيوم ++Ca تنتقل بسرعة خلال التربة إلى الجذر بواسطة التدفق الجماعي ومن ثم قدرة الجذر أو الفطريات الجذرية هي التي تحدد قدرة امتصاص مثل هذه الأيونات.

بينما بعض الأيونات مثل أيونات الفوسفات H_2PO_4 والأمونيوم $_{NH}4$ والزنك Zn والنحاس Cu ضعيفة الحركة، وتنتقل إلى الجذر بواسطة الانتشار، ومن المتوقع أن تزيد نسبة امتصاص هذه الأيونات بواسطة الفطريات الجذرية؛ وذلك لأن هذه الأيونات قد تنتقل بسرعة في الخيوط الفطرية أسرع من الانتشار بالتربة.

الفسفور Phosphorous

يُعدّ الفسفور من العناصر الغذائية الأساسية في تغذية ونمو النبات، وينتشر في محلول التربة في المحيط الجذري Rootspher، ويوجد الفسفور في التربة على ثلاثة أشكال هي:

الفسفور غير العضوي الذائب في محلول التربة.

الفسفور غير العضوي غير الذائب الموجود في البلورات الشعرية.

الفسفور العضوي الموجود في المركبات العضوية مثل الفوسفات النباتية phytate.

الفوسفات ضعيفة الحركة في التربة، وتنتقل بواسطة الانتشار البطيء diffusion إلى جذور النبات، ومن ثم سرعان ما تتكون منطقة خالية من الفوسفات depletion zones حول الجذر، وخاصة في التربة الفقيرة في الفوسفات المتاحة الشكل(7-7)وآلية (ميكانيكية) امتصاص وانتقال الفسفور والمغذيات الأخرى بواسطة الفطريات الجذرية لم تفهم جيدًا حتى الآن، ولكن هناك نظريات عدة اقترحت بواسطة العالمين Safir & Nelson في عام 1981م توضح تحسن المواد الغذائية في النباتات المصابة بفطريات الجذور، وهي:

1. أن جذور النباتات المصابة بفطريات الجذور قد تكون أكثر فعالية في امتصاص المغذيات.

2. أن جهاز جذور النباتات المصابة بالفطريات (الجذر + الفطر) قد يستطيع استعمال المغذيات غير المتاحة أو قليلة الإتاحة للجذور غير المصابة.

3. أن شبكة خيوط الفطريات الجذرية الخارجية الموجودة في التربة تستطيع امتصاص المغذيات من حجم أكبر من التربة، وتنقلها إلى الجذور المصابة.

4. أن أجزاء الجذور المصابة بالفطريات الجذرية تبقى فعالة بوصفها أعضاء امتصاص لمدة أطول من الجذور غير المصابة.

وهناك اقتراح بأن فطريات الجذور الحويصلية الشجرية VAM تستطيع إذابة مصادر الفسفور التي تكون غير متاحة للنباتات غير المصابة، وقد وُجِد أن النباتات المصابة VAM غالبًا تستجيب لإضافة الفوسفات غير الذائبة مثل الفوسفات ثلاثية الكالسيومTricalcium phosphate والفوسفات الحجرية Rock phosphate وهذه تكون غير متاحة للنباتات غير المصابة بفطريات الجذور، وهناك احتمالات ميكانيكية عدة تفسر مقدرة الفطريات الجذرية على استعمال مصادر الفوسفات غير الذائبة منها:

أ) أن الفوسفات العضوية Organic قد تصبح متاحة للنباتات المصابة من خلال فعل أنزيمات الفسفور phosphatases وينتشر نشاط هذه الأنزيمات في التربة، وذلك بوجود بعض الكائنات الحية الدقيقة، وقد وُجِد أنزيم Acid phosphatase في الخيوط VAM النامية ولُوحِظ زيادة نشاط هذه الأنزيمات على سطح الجذر بواسطة الإصابة بالفطريات الجذرية ما ينتج عنه تحرير الفسفور غير العضوي من الفوسفات العضوية.

ب) مصادر الفوسفات غير العضوية Inorganic يمكن أن تذاب بفعل الأحماض العضوية، وهناك عدد من الفطريات تنتج مثل هذه الأحماض مثل حمض الأوكسالك Oxalic acid.

ج) إضافة إلى أن بعض البكتيريا والفطريات المذيبة تطلق الفوسفات في التربة، ويمكن أن تستغل فطريات الجذور مثل هذه المصادر الإضافية.

تأثير الفسفور في الإصابة بفطريات الجذور

Effect of phosphorours on Mycorrhizal Infection

هناك عدد من العوامل البيئية وعوامل التربة يمكن أن تؤثر في تكوين الإصابة في الجذور، ولكن أحد هذه العوامل المهمة الذي يتحكم في الإصابة هو الفسفور الموجود في التربة وفي النبات، وغالبًا تركيز الفسفور العالي في التربة يمنع أو يقلل نسبة الإصابة، ولم يعرف حتى الآن ما إذا كان

الفسفور يؤثر في تكوين الفطر في التربة خارج الجذر أو في الإصابة وتكوين الفطر داخل الجذر، وتشير بعض الدلائل القوية على أن محتوى الفسفور في نسيج النبات هو الذي يتحكم في الإصابة بدلًا من الفسفور الموجود في التربة.

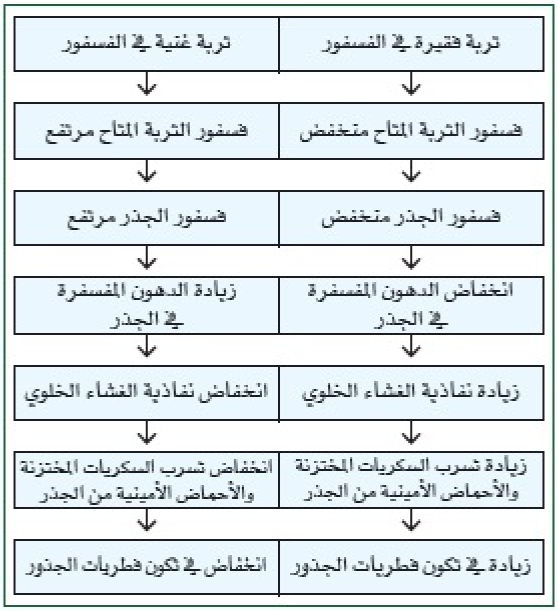
ومن الجدير بالذكر أنه قد وُجِد أن هناك بعض الأنزيمات الفسفورية المتخصصة بفطريات الجذور Mycorrhiza-specific phosphatases التي تكون مرتبطة مع معظم المراحل النشطة للإصابة قد تقوم بهذه العملية (Rouse et. al. 2008, Schaechter et. al. 1993, Ullah et. al. 2016). ووُجِد أن نشاط هذه الأنزيمات يقل في حالة التراكيز العالية للفسفور، وهذا مما يدل على ميكانيكية الفسفور لمنع إصابة الجذور بفطريات الجذور، وإن حالة الفسفور في النبات يمكن أن تؤثر في محتوى الجذر من الكربوهيدرات الذائبة وفي إفرازات الجذر، ومن ثم في تنظيم مصدر الكربون وإتاحته للفطر. والشكل (7-7) يوضح الشكل المقترح لآلية تحكم الفسفور في الإصابة.

ومن المعروف أن الغشاء الخلوي يتركب من دهون مفسفرة Phospholipids والبروتين.

وتشير بعض المصادر القوية إلى أن آلية تحكم الفسفور في الإصابة مرتبطة بدرجة نفاذية الغشاء الخلوي للجذر أكثر من التغير في محتوى الجذر من الكربوهيدرات.

وقد اقترح بعض العلماء أن تركيز الفسفور المنخفض يزيد من نفاذية الغشاء الخلوي للجذر ما يزيد من فقدان المواد الأيضية من الجذر بما يكفي للإبقاء على نمو الفطر الجذري خلال الإصابة وبعدها، بينما في التراكيز العالية من الفسفور في النبات فإن الفسفور يقلل من نفاذية الغشاء الخلوي للجذر، ومن ثم تقل إفرازات الجذر من السكريات وغيرها ما يقلل نسبة الإصابة (الشكل 7-7).

وتختلف فطريات الجذور في حساسيتها ومدى تحملها للفسفور، فبعضها يتحمل التراكيز العالية من الفسفور، وتنمو فيها وبعضها الآخر لا يتحمل التراكيز العالية، وتختلف النباتات في متطلباتها من الفسفور.


تربة فقيرة في الفسفور
فسفور التربة المتاح منخفض
فسفور الجذر منخفض
انخفاض الدهون المفسفرة في الجذر
زيادة نفاذية الغشاء الخلوي
زيادة تسرب السكريات المختزنة والأحماض الأمينية من الجذر
زيادة في تكون فطريات الجذور
تربة غنية في الفسفور
فسفور التربة المتاح مرتفع
فسفور الجذر مرتفع
زيادة الدهون المفسفرة في الجذر
انخفاض نفاذية الغشاء الخلوي
انخفاض تسرب السكريات المختزنة والأحماض الأمينية من الجذر
انخفاض في تكون فطريات الجذور

الشكل (7-7): آلية تحكم فسفور الغشاء الخلوي في الإصابة بفطريات الجذور.

تخصصية الفطر والعائل Specificity Host – Fungus

يتطلب تكوين الفطريات الجذرية وجود العائل والفطر المناسبين لبناء العلاقة التكافلية فيما بينهما، وعندما يوجد العائل والفطر المناسبان فإن الإصابة تعتمد على:-

1) جذر النبات وعلى 2) اللقاح Inoculum ثم على 3) مقدرة الإصابة على الانتشار، وهذه تتأثر كثيرًا بالظروف البيئية المحيطة في مكان وجود العائل والفطر.

وقد تأتي التخصصية من العائل الذي هو النبات أو من الفطر الذي قد يكون محددًا بمشارك نوع واحد معين، فمثلًا قد يكون الفطر(s1) محددًا بعائل واحد (h1) الذي قد يقبل أكثر من فطر؛ أي إن الفطر يكون متخصصًا والعائل غير متخصص، وإن العائل (h1) قد يحدد بنوع واحد من الفطريات(s1) الذي قد يصيب أكثر من عائل؛ أي إن العائل متخصص والفطر غير متخصص.

وقد اقترح العالم Baylis في عام 1975م أنه في أثناء تطور النباتات فإن أنواع النباتات ذات الجذور البدائية الخشنة المعروفة بالجذور الماقنولي Magnolioid ”Coarse“ قد أصبحت تعتمد على فطريات الجذور في امتصاص المغذيات،

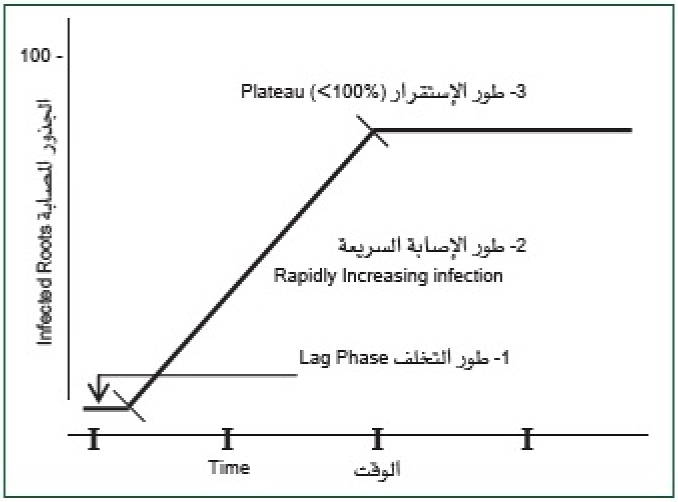
بينما الأنواع ذات الجذور الدقيقة الناعمة غزيرة التفرع المعروفة بعشبية الجذور (Graminoid root) تعتمد أساسًا على الشعيرات الجذرية في امتصاص المغذيات، وقد لاقت هذه النظرية القبول والاستحسان لدى عدد من العلماء، وتوضح هذه النظرية أن نسبة الإصابة تتناسب تناسبًا عكسيًّا مع طبيعة دقة وتفرع النظام الجذري العشبي (Graminoid nature).

لكن بعض النباتات ذات الجذور الطويلة والشعيرات الجذرية الغزيرة وُجِد أنها تحتوي على نسبة عالية من الإصابة، وتستجيب استجابة جيدة للفطريات الجذرية، ووُجِد أن هناك اختلافات كبيرة في تكوين الفطريات الجذرية VAM في أصناف مختلقة من القمح Wheat cultivars، وهذا قد يقترح أن هناك نوعًا من التحكم الوراثي Genetic Controlفي مستويات الإصابة Infection levels.

منحنى الإصابة Infection Curve

تمر إصابة جذور النباتات بالفطريات الجذرية Mycorrhiza بثلاثة أطوار رئيسة متتالية بدءًا من مرحلة التهيئة وتكاثر الفطريات في المحيط الجذري في التربة، وهذه الأطوار هي (الشكل 7-8):

- الطور المتخلف Lag Phase: هذا الطور يوضح عملية بداية تكوين الإصابة البطيئة؛ وذلك لأن الفطر يحتاج إلى وقت ليتكاثر، ويبدأ الإصابة وكذلك الجذور.
- طور الإصابة Infection Phase: وفيه تكون الإصابة سريعة، وذلك بسبب غزارة القشرة الجذرية التي تسمح بالإصابة الداخلية للجذر وغزارة نمو الجذر والفطر.
- طور الاستقرار Plateau: في هذا الطور تكون نسبة الإصابة متوازنة مع نمو الجذر، ومع انتشار الفطر.



الشكل (7-8): يوضح منحنى الإصابة بفطريات الجذور الحويصلية الشجرية VAM.

وتشير بعض التقارير إلى أن فطريات الجذور الخارجية Ectomycorrhiza تكون أكثر انتشارًا في الطبقات العليا من التربة التي تحتوي على نسبة عالية من البقايا والدبال الخام Humus، وتتركز الجذور الفطرية بشكل عام في طبقات البقايا (الجدول 7-5)، وخاصة في الغابات الاستوائية

قد يوضح مدى أهميتها في دورة (تدوير) المغذيات Nutrient cycling والمحافظة على المغذيات من التعدين والتسرب إلى أسفل.

جدول (5-8): يوضح العلاقة بين عمق الجذور ووزنها الرطب ونسبة الإصابة والفوسفات المتاحة في أرض عشبية Pinnine grassland.

Depth (cm)	Root Fresh Wt.(g/L)	Mycorrhizal Root (%)	P (mg/ kg)
5	91	30	15.5
10	25	42	4.5
25	7	43	3.4

تفاعل فطريات الجذور مع الكائنات الحية الدقيقة الأخرى

Mycorrhizal Interaction With Other Microorganisms

غالبًا ما يصاب المجموع الجذري للنباتات المصابة بفطريات الجذور بأنواع مختلفة من الكائنات الحية الدقيقة الممرضة وغير الممرضة، وحيث إن تأثير هذه الكائنات الحية الدقيقة عكس تأثير فطريات الجذور، فإن نتيجة التفاعل أو التحدي بين هذه الكائنات يعتمد على نوع الفطر الجذري، ونوع الكائن الحي الممرض، ونوع النبات العائل الداخلة في هذا التفاعل، ويمكن تقسيم التفاعل أو التحدي إلى ثلاثة أقسام هي:

1- تفاعل متعادل Neutral interaction

إذا لم تؤثر فطريات الجذور في تكوين المرض، ولم تؤثر الكائنات الممرضة في العلاقة التكافلية أو في النشاطات الأخرى للكائنين الدقيقين.

2- تفاعل إيجابي Positive interaction

إذا تكافأ أو تعادل تأثير فطريات الجذور مع تأثير الكائن الممرض، وذلك بتأثيرها في قدرة الكائن الممرض على تدمير النبات أو بتأثيرها في تكوين الأبواغ.

3- تفاعل سلبي Negative interaction

إذا حث الفطر الجذري تكون المرض، أو تكاثر الكائن الممرض، أو إذا ثبط الكائن الممرض تكون فطريات الجذور.

التطبيقات الزراعية Agricultural Applications

عند استخدام فطريات الجذور في برنامج الإنتاج الزراعي يجب الأخذ في الحسبان النقاط الآتية:

1. يجب أن يحدد مدى اعتماد النبات العائل على الإصابة بفطريات الجذور ومدى الفائدة من الحقن بهذه الفطريات.

2. يجب دراسة صفات وكميات مجاميع الفطريات الجذرية الطبيعية (المستوطنة) في التربة، ومن ثم اختيار أفضل الأنواع الذي يناسب العائل تحت الظروف البيئية وظروف التربة السائدة.

3. أن تكون هذه الفطريات متلائمة (متأقلمة) تمامًا مع الظروف الزراعية وظروف التحكم في الآفات السائدة.

4. أن يكون إنتاج وتطبيق اللقاح فعالًا وذا مردود اقتصادي جيد ينعكس على وفرة المحصول الزراعي وغزارة الإنتاج.

وفيما يلي نسوق أمثلة على التطبيقات الزراعية:

أ) خير مثال على التطبيق الفعلي للفطريات الجذور الحويصلية الشجرية VAM في المشاتل الزراعية، حيث إن التربة غالبًا تعقم لمنع نمو الفطريات والديدان الحلقية الممرضة، وهذا ما يؤدي إلى القضاء أو تخفيض نسبة فطريات الجذور في هذه التربة، حيث وُجِد أن نمو بادرات الحمضيات Seedlings المزروعة في مثل هذه التربة يكون غير طبيعي وتكون قصيرة جدًّا، وتبدو غير صحيحة؛ وذلك لعدم وجود الإصابة الكافية (Ullah et. al. 2015, Watnick & Kolter 2000). وبعد إضافة فطريات الجذور وُجِد أنها تنمو نموًّا طبيعيًّا، وحتى عند إضافة كمية كبيرة من الفسفور إلى هذه التربة لم تحل تأثير التعقيم تمامًا، وإنما حلته حلًّا جزئيًّا فقط، وقد وُجِد أن بعض سلالات الحمضيات تعتمد اعتمادًا كبيرًا على

فطريات الجذور.

ب) ووُجِد أن فطريات الجذور تساعد على سرعة نمو النباتات التي تتكاثر بواسطة القطع أو العقل، ووُجِد أن نمو قطع نبات خشب الحوار الأصفر Yellow poplar زاد بتسعة أضعاف (x9)عند حقنها بفطريات الجذور الداخلية.

ج) ووُجِد أيضًا أن فطريات الجذور تساعد بعض النبات على النمو في المناطق التي حول مناجم الفحم والتي دمرت بواسطة الفحم، حيث إن مثل هذه المناطق تكون عالية الحموضة، وتحتوي على

كميات قليلة من الفسفور والنيتروجين.

الفصل الثامن

دورات المعادن والماء في الطبيعة

The Mineral and Water Cycles

- ◄ الكربون.
- ◄ النيتروجين.
- ◄ الفسفور.
- ◄ الكبريت.
- ◄ الأوكسجين.
- ◄ الماء.

الفصل الثامن
دورات المعادن والماء في الطبيعة
The Mineral and Water Cycles

يبرز دور الأحياء الدقيقة في زيادة خصوبة التربة والتحلل الحيوي وإكمال دورات العناصر المختلفة في الطبيعة ومنها الكربون، والأوكسجين، والنيتروجين، والفسفور، والكبريت، والماء، حيث تضم الأحياء الدقيقة مجموعة هائلة من الكائنات الحية تشمل البكتيريا، والفطريات، والطحالب، وهذه الكائنات الحية الدقيقة أوجدها الله سبحانه وتعالى في هذا الكون الفسيح لتشكل جزءًا مهمًّا وأساسيًّا في النظام البيئي، ممثلة للمحللات Decomposers، وأودع فيها الخالق سبحانه وتعالي من الخصائص والصفات ما يمكنها من القيام بدورها في النظام البيئي على أكمل وجه وبكل مهارة واقتدار، وسوف أستعرض فيما يأتي أبرز الجوانب التطبيقية والصفات والخصائص لكل منها، والأهمية الاقتصادية لهذه الكائنات الحية الدقيقة التي تعكس أهمية الدور الذي تقوم به هذه الكائنات الحية الدقيقة في البيئة المحيطة بنا وبجميع مكونات النظام البيئي.

وإضافة إلى النشاطات التي تقوم بها الكائنات الحية الدقيقة في الطبيعة سواءً ما كان منها متعلقًا بتحليل المواد أو زيادة خصوبة التربة أو دورات المعادن، فهناك كثير من النشاطات الميكروبية التي تعود على الإنسان بالنفع والفائدة، والتي تشمل الاستخدامات الكثيرة للكائنات الحية الدقيقة في حياتنا اليومية، واستغلالها مباشرة بوصفها غذاءً للإنسان ودواءً، وتستعمل أيضًا في بعض العمليات الصناعية لإنتاج بعض المواد الغذائية (Medema & Fischbach 2015, Hugenschmidt et. al. 2011)، فهناك عدد كبير من المعادن والعناصر الغذائية التي يحتاج إليها النبات في تغذيته، وتقسم إلى عناصر كبرى يستهلكها النبات بكميات كبيرة، وعناصر صغرى، وهي التي يحتاج إليها النبات بكميات قليلة، وتشمل هذه العناصر الكربون، والنيتروجين، والفسفور، والبوتاسيوم، والكبريت، والمغنيسيوم، والحديد، والمنجنيز، والزنك والرصاص، وغيرها من المعادن الثقيلة (Paul and Clark 1989).

وتعتمد التغذية المعدنية للنبات من التربة على المعادن المتاحة في محلول التربة، وهذه المعادن متجددة بفعل دور الكائنات الحية الدقيقة (بكتيريا، وفطريات) في تحليل البقايا النباتية والحيوانية وتفتيتها إلى مكوناتها الأساسية من العناصر والمعادن التي تضاف إلى مكونات التربة؛ ليستخدمها النبات في تغذيته من جديد.

فالأحياء الدقيقة لها دور مهم وأساسي في دورة هذه المعادن في الطبيعة وتحويلها من مركباتها المعقدة الكبيرة إلى صور بسيطة تتحرر منها إلى التربة لتشكل معادن وعناصر خامًا يستخدمها النبات في تغذيته مرة أخرى بالحصول عليها من التربة في بناء جسم النبات وإنتاج الثمار والحبوب

والخضراوات والفواكه المتنوعة في الخصائص والتركيب (Hughes and Poole 1989، and Wainwright 1995 Al-Falih). ومن ثم يتغذى الإنسان والحيوان على هذه النباتات المختلفة، وتعاد دوراتها.

وبعد موت هذه الكائنات الحية تتحل جثثها بفعل الكائنات الحية الدقيقة إلى مكوناتها الأساسية التي تضاف إلى التربة من جديد، فيتغذى عليها النبات، ويعيد هذه الدورة باستمرار حتى يرث الله الأرض ومن عليها، وفيما يأتي عرض موجز لدورات أهم العناصر والمعادن الغذائية في الطبيعة:

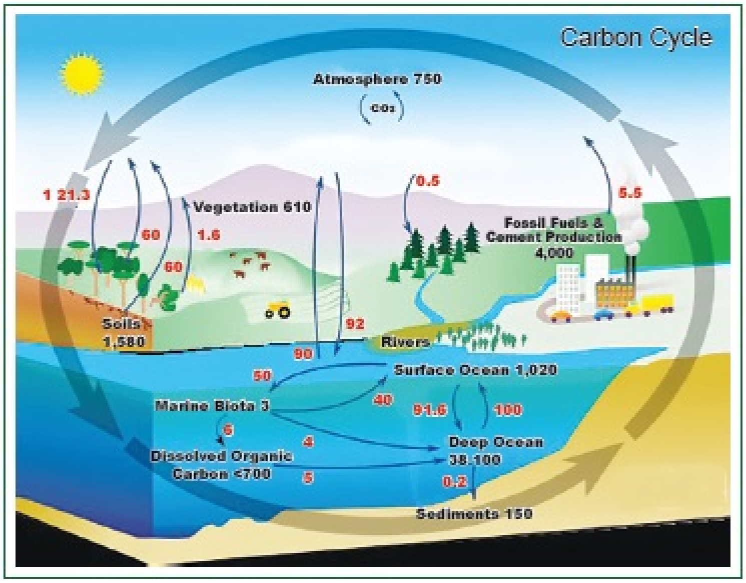
دورة الكربون

إن المصدر الوحيد للكربون الذي تستخدمه النباتات ذاتية التغذية للقيام بعملية بناء المادة العضوية هو غاز ثاني أكسيد الكربون الموجود في الجو أو المذاب في الماء، وإن كربون الصخور الموجود على شكل كربونات لا تستفيد منه النباتات في هذه العملية، والكربون عنصر أساسي للحياة، فلا توجد حياة من دون كربون (وهذا شيء مطلق). وباستثناء الماس، فإن الكربون مصدره الكائنات الحية، ويُعدّ الغلاف الغازي والغلاف المائي المستودع الرئيس للكربون غير العضوي (Carbon Sink)، ويوجد الكربون في الطبيعة في حالة صلبة في الطبقات الصخرية، وفي المركبات العضوية، وفي حالة سائلة في خلايا الكائنات الحية وفي المياه، ويوجد الكربون في حالة غازية في الغلاف الجوي وهواء التربة كما في الشكل (8-1)، وبين هذه الحالات يتم التفاعل والتبادل في دورة الكربون (الفالح 1426هـ)، وتبدأ دورة الكربون بأن تقوم النباتات الخضراء والطحالب الخضراء بأخذ ثاني أكسيد الكربون من الهواء المحيط، وبأخذ الماء من التربة بواسطة الشعيرات الجذرية، ثم تستخدم الطاقة الشمسية للقيام بعملية التمثيل الضوئي وإنتاج المركبات العضوية بحسب المعادلة الآتية:

$$H_2O + 6CO_2 \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_26$$

وتتوقف في أثناء الليل عملية التمثيل الضوئي، ويحل محلها عملية التنفس، وينتج عن ذلك غاز ثاني أكسيد الكربون الذي يعود إلى الغلاف الغازي، وفي المناطق التي ترتفع فيها كثافة النباتات تزداد نسبة غاز ثاني أكسيد الكربون في الليل إلى نحو 25% عن المعدل الطبيعي، وبخاصة في الجزء القريب من التربة، ومع طلوع الشمس تأخذ نسبة ثاني أكسيد الكربون في العودة إلى معدلها الطبيعي، وعندما تتغذي المستهلكات على المواد العضوية تتحول تلك المواد إلى كتلة حيوية، وينطلق غاز ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الغازي عن طريق التنفس، وينتج عن الكائنات الحية المنتجة والمستهلكة إفرازات وفضلات، وبعد موت هذه الكائنات الحية (بعد مدة من الزمن بحكم قوانين الطبيعة التي أودعها الله سبحانه وتعالى فيها) تتعرض إفرازاتها إلى عمليات تحلل، ويعود معها ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الغازي ثانية (ريفن وآخرون 2002م)، ويترتب على عمليات تجوية الصخور الكلسية العضوية (Organic Limestone) والدولوميت (Dolomite) التي

أسهمت في تكوينها المواد العضوية، عودة قسم من الكربون المثبت إلى الغلاف الغازي، وكذلك البراكين تقوم بإعادة قسم من الكربون إلى الغلاف الغازي، حيث تأخذ النباتات الخضراء والطحالب من جديد ثاني أكسيد الكربون، وتدور الدورة، وتجدر الإشارة إلى أنه لكل جزء من دورة الكربون أهمية خاصة، فإذا قُضي على النباتات الخضراء والطحالب مثلًا لا يمكن أن يخرج الكربون من المستودع الجوي، حيث إن الكائنات المستهلكة لا تستطيع أن تستفيد من غاز ثاني أكسيد الكربون الجوي وتحويله إلى مركبات عضوية، ولو قُضي على الكائنات المحللة، فإن المادة العضوية المتخلفة عن إفرازات الكائنات الحية وعن بقايا أجسامها ستتراكم بسرعة، ولا يعود الكربون إلى الغلاف الغازي، وبذلك تختل الدورة.


Carbon Cycle
Atmosphere 750
CO₂
1 21.3
60
60
1.6
Vegetation 610
0.5
5.5
Fossil Fuels & Cement Production 4,000
Soils 1,580
92
90
Rivers
Surface Ocean 1,020
50
Marine Biota 3
40
91.6
100
6
4
Deep Ocean 38,100
Dissolved Organic Carbon <700
5
0.2
Sediments 150

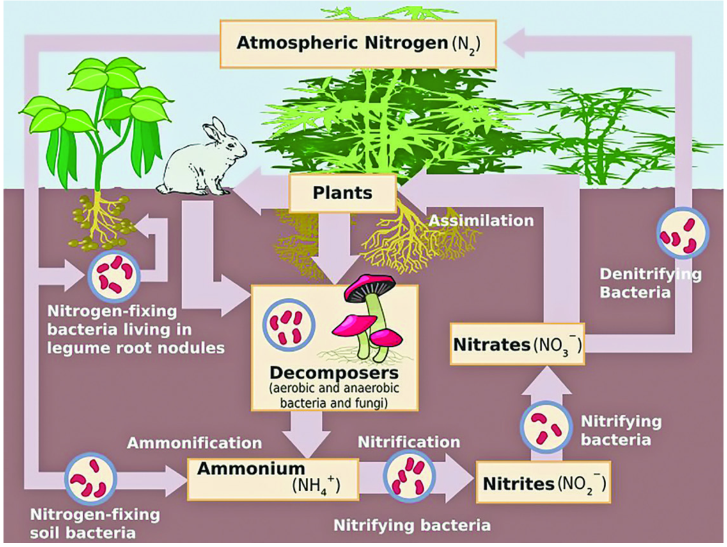
الشكل (8-1): دورة الكربون في الطبيعة.

إن أهم وظيفة تقوم بها الكائنات الحية الدقيقة، هي إعادة تفتيت وتحليل المواد العضوية محررة غاز CO2 الضروري لعملية البناء الضوئي، ويمكن أن يُستدل على نشاط الكائنات الحية الدقيقة بمعرفة نواتج تحلل المواد العضوية (أبو زنادة 1403هـ، Hughes and Poole 1989).

دورة النيتروجين

يشكل غاز النيتروجين نحو 78% من حجم الهواء الجاف، وهو غاز خامل عديم النفع لمعظم الكائنات الحية، وللاستفادة من النيتروجين المتوافر في الغلاف الغازي بكميات كبيرة لا بد من تحويل هذا الغاز الخامل إلى مركبات نيتروجينية تستطيع الكائنات الحية الاستفادة منها، وتسمى عملية التحويل هذه تثبيت النيتروجين (أبو زنادة 1403هـ، Nitrogen Fixation).

النيتروجين عنصر ضروري لحياة الكائنات الحية، حيث يدخل في تركيب كثير من المركبات المهمة كالأحماض النووية والبروتينيات، ويتحد النيتروجين مع الأوكسجين في الجو بسبب الشرر الكهربائي الناتج عن البرق، فتتكون أكاسيد نيتروجينية تذوب في ماء المطر، ثم تتحول في التربة بوساطة بكتيريا النيتروباكتر Nitrobacter إلى نترات Nitrate ((NO3 يمتصها النبات، ثم تتحول إلى مركبات نيتروجينية مهمة داخل جسم النبات كما في الشكل (2-8).


Atmospheric Nitrogen (N_2)
Plants
Assimilation
Denitrifying Bacteria
Nitrogen-fixing bacteria living in legume root nodules
Decomposers (aerobic and anaerobic bacteria and fungi)
Nitrates (NO_3^-)
Nitrifying bacteria
Ammonification
Nitrification
Ammonium (NH_4^+)
Nitrites (NO_2^-)
Nitrogen-fixing soil bacteria
Nitrifying bacteria

الشكل(2-8): دورة النيتروجين في الطبيعة.

ويثبت النيتروجين أيضًا بوساطة بعض أجناس من البكتيريا مثل كلوستريديم Clostridium وأزوتوباكتر Azotobacter وبعض الطحالب في صورة مركبات عضوية تتخلف في التربة، ويمتصها النبات، وتقوم بكتيريا العقد الجذرية، التي تعيش في جذور النباتات البقولية، وهي من جنس ريزوبيم Rhizobium، بتثبيت النيتروجين في صورة أحماض أمينية تستفيد منها النباتات (الغنيم وآخرون 1996م).

وتنتقل المركبات النيتروجينية من النباتات إلى الحيوانات آكلة العشب، ومنها إلى آكلات اللحوم، وتعود المركبات النيتروجينية إلى التربة مرة أخرى في صورة مخلفات الحيوانات وأجسام النباتات والحيوانات الميتة، حيث تتحلل بفعل الكائنات الحية الدقيقة في التربة إلى مركبات نيتروجينية بسيطة تمتصها النباتات، ويكون من بينها النشادر الذي يذوب في الماء، ويمتص بواسطة النباتات والكائنات الحية الدقيقة، حيث يتحول إلى أحماض أمينية يتحد بعضها مع بعض لتكوين البروتينات.

وينطلق النيتروجين من بعض بكتيريا التربة إلى الهواء مرة أخرى ليشكل مع النيتروجين المتصاعد من البراكين غاز النيتروجين في الهواء الجوي، وبذلك تستمر دورة النيتروجين، وفي دورة

النيتروجين تمتص النباتات النترات Nitrate من التربة، وتستعملها في صنع البروتينات وغيرها من المركبات العضوية النيتروجينية.

وتستهلك الحيوانات جانبًا من البروتينات التي تنتجها النباتات بغذائها عليها، وتستعملها في بناء بروتيناتها، وتحلل البكتيريا والفطريات النباتات والحيوانات بعد موتها، وينتج عن ذلك تكوين النشادر والمركبات النشادرية، التي تتأكسد إلى نتريتات ونيترات بفعل البكتيريا الموجودة في التربة (ويلسون وآخرون 1989م).

دورة الفسفور

تُعدّ دورة الفسفور من أهم الدورات الرسوبية؛ وذلك لأهمية الفسفور في تركيب المادة الحية والمادة الوراثية والعظام، علاوة على أهمية الفسفور في تزويد خلايا الكائنات الحية بالطاقة، ويُعدّ من العناصر الغذائية الكبرى.

وتشكل صخور الفوسفات المستودع الرئيس لدورة الفسفور، فبواسطة عملية التجوية (وهي جميع العوامل التي تؤدي إلى تفكك وتفتيت وتحلل الصخور إلى مواد هشة تعرف بالمواد الأولية التي تتكون منها معادن التربة فيما بعد) يتم إطلاق قسم من الفوسفات إلى الدورة، وتسهم البراكين أيضًا في إضافة قسم من الفوسفات الموجود في باطن الأرض إلى دورة الفسفور (الطرابلسي 2001م).

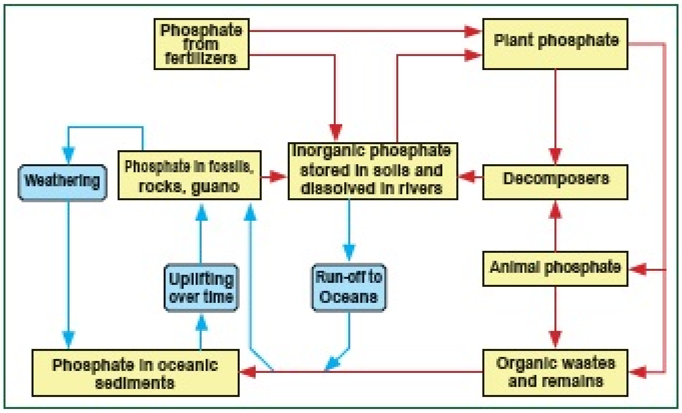
وتبدأ دورة الفسفور بأن تقوم المنتجات بأخذ الفسفور على شكل أيونات بواسطة الجذور الشعرية لاستخدامه في عملية البناء الخلوي، وتحصل المستهلكات على الفسفور من المنتجات بحسب قانون السلسلة الغذائي. وعند موت الكائنات الحية المنتجة والمستهلكة تقوم الكائنات الحية الدقيقة المحللة بتحليل المركبات العضوية المكونة لأجسام الكائنات الميتة وتحويلها إلى مواد بسيطة وعناصر معدنية مفككة تمتصها النباتات من جديد، وبذلك تُغلَق الدورة كما في الشكل (8-3).

وتفقد غالبية مركبات الفسفور عند انجراف التربة بواسطة التيارات السفلية، ولا تعود إلى المستودعات الأرضية أو إلى الدورة إلا عند حدوث اضطرابات تكوينية، فتظهر مع الصدوع بعد مدة طويلة جدًّا من الزمن، ولكن يعود قسم من الفوسفات إلى دورة الفسفور من جديد عندما تقوم المنتجات المائية بأخذ الفسفور المذاب في الماء ومن الرواسب الساحلية الضحلة، وتستوعبه في خلاياها، ومن ثم تتغذى عليه المستهلكات، فعلى سبيل المثال يقوم سمك السلمون بنقل الفسفور داخل عظامه من البحار والمحيطات إلى مياه الأنهار الداخلية العذبة (عبدالمعطي، 1999م).

وترمي الطيور البحرية التي تتغذى على الأسماك فضلاتها على الشواطئ، حيث يقوم الإنسان بجمع هذه المخلفات واستعمالها في الزراعة، ومن ثم تكون كمية الفسفور المفقودة في النظام البيئي المتوازن قليلة جدًّا، ولكن عند إزالة الغطاء النباتي تتعرض التربة للانجراف بفعل المياه والرياح ما

يؤدي إلى فقدان كميات كبيرة من الفسفور، وذلك أن الفسفور يبقى -غالبًا- في الطبقات العليا من التربة، ولا يتحرك إلى الأسفل إلا في حالات قليلة.

ويقوم الإنسان في الوقت الحاضر بتعدين الفوسفات من الصخور الفوسفاتية لتصنيع الأسمدة الفوسفاتية والمنظفات الكيماوية والمبيدات وغير ذلك من الاستعمالات، ومن ثم إدخالها إلى دورة الفسفور، ما يزيد من سرعة دورة الفسفور واستهلاك المخزون الفوسفاتي، إذ يُعتقَد أن هذا المخزون سينضب قبل نهاية القرن الواحد والعشرين (Subbarao 1981).


Phosphate from fertilizers
Plant phosphate
Weathering
Phosphate in fossils, rocks, guano
Inorganic phosphate stored in soils and dissolved in rivers
Decomposers
Uplifting over time
Run-off to Oceans
Animal phosphate
Phosphate in oceanic sediments
Organic wastes and remains

الشكل (3-8): دورة الفسفور في الطبيعة.

وتدخل كميات من الفسفور بواسطة المياه العذبة وانجراف التربة وغير ذلك من الطرق إلى مصادر المياه السطحية، بحيث يؤدي ذلك إلى حدوث عملية الإثراء الغذائي، وتؤدي الفوسفات المذابة -ولو بتركيز قليل- إلى زيادة الكتلة الحية من الطحالب الخضراء ونباتات مائية خضراء التي عند موتها تترسب، وتبدأ في التحلل مستهلكة الأوكسجين المذاب في الماء، ما يؤدي إلى استهلاك الأوكسجين، والقضاء على الكائنات الحية الهوائية، وانقلاب عملية التحلل الهوائية إلى عملية تحلل لا هوائية ينتج عنها الغازات السامة والروائح الكريهة، مثل غاز كبريتيد الهيدروجين، والميثان، والأمونيا.

ويدخل الفسفور في تركيب كثير من المركبات المهمة في الكائنات الحية كالأحماض النووية وكثير من الأنزيمات، وتشكل الدهون الفوسفاتية جزءًا مهمًا من الغشاء البلازمي للخلايا الحية، ويوجد الفسفور في صورة صخور فوسفاتية في الأرض، ونتيجة لتفتت هذه الصخور ينتقل الفسفور في صورة مركبات غير عضوية إلى التربة التي تنمو بها النباتات، ويضاف إلى التربة بوصفه أسمدة عضوية، وتمتص النباتات الفسفور من التربة لتستفيد منه في بناء جسمها، وينتقل منها إلى الحيوانات آكلة العشب، ومنها إلى آكلات اللحوم.

ويعود الفسفور إلى الأرض ضمن مخلفات الحيوانات وأجسام النباتات والحيوانات الميتة، وبتحلل هذه الأجسام تنتج مركبات فوسفاتية قابلة للذوبان في ماء التربة، حيث يمتصها النبات مرة أخرى،

وأما بعض المركبات غير العضوية فتترسب في الأرض، وتتمعدن لتصير معادن فوسفاتية، وفي البحار والمحيطات تعيش كائنات بحرية نباتية وحيوانية أهمها الطحالب والأسماك التي تحصل على حاجتها من الفوسفات من المركبات الفوسفاتية الذائبة في مياه البحار، وتتغذى بعض الكائنات البرية والطيور البحرية على الكائنات البحرية، فتنتقل إليها مركبات الفسفور، ومن هذه الكائنات يعود الفسفور مرة أخرى إلى الأرض في شكل مخلفات حيوانية، وأجسام نباتية، وحيوانية ميتة، وهكذا تستمر دورة الفسفور.

دورة الكبريت

يوجد الكبريت في التربة الزراعية في الصورة المعدنية والصورة العضوية، حيث يصل الكبريت إلى التربة، إما في صورة مخلفات زراعية، وأسمدة معدنية مع مياه الأمطار، أو مع المكونات المعدنية للتربة والناتجة من عمليات التجوية للصخور الغنية بالكبريت والناتجة من النشاط البركاني.

ويوجد معدن الكبريت في تركيب بعض المعادن الأرضية، ومنها البيريت خاصة في الأراضي الغدقة، في حين يوجد الجبس أو كبريتات الكالسيوم في المناطق الجافة، ويزداد تراكم الكبريت مع بعض مركبات الكبريتات لعناصر المغنيسيوم والصوديوم (الطرابلسي، 2001م).

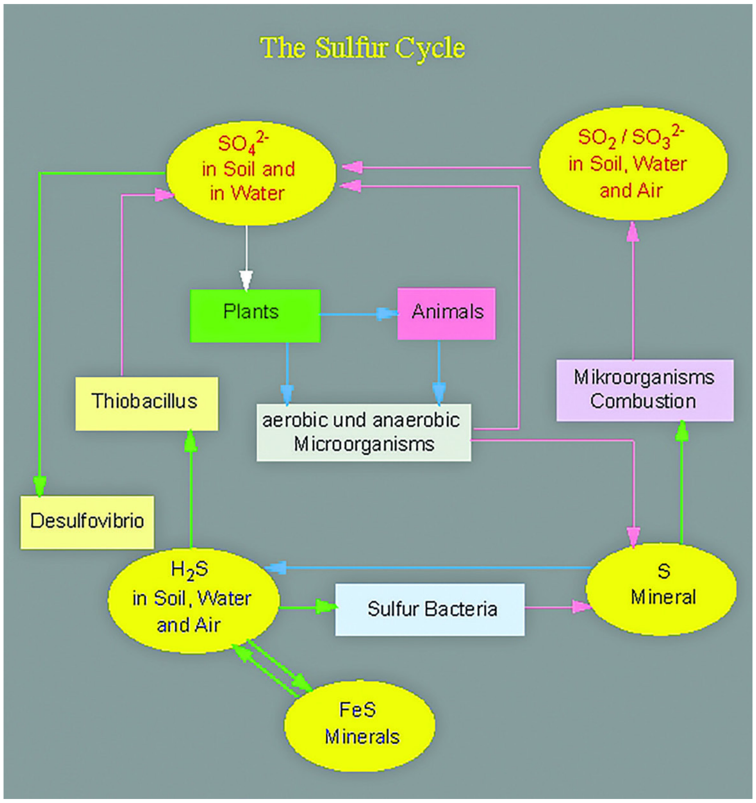
ويُعدّ الكبريت العضوي هو الصورة الأكثر وجودًا في الطبقة السطحية من الأرض الزراعية، حيث تُعدّ المادة العضوية مصدرًا رئيسًا للكبريت في الأرض الزراعية خاصة في المناطق الرطبة، ويوجد الكبريت في تركيب الأحماض الأمينية، مثل: السيستين، والمثيونين، وهذه المكونات تتحلل بفعل الكائنات الأرضية، وينطلق منها الكبريت المعدني في عملية تعرف بعملية المعدنة.

الكبريت المضاف للتربة مع مياه الأمطار والأنهار

نتيجة لاحتراق المركبات الكبريتية كالفحم والمواد البترولية، وأيضًا مع الأبخرة الناتجة من النشاط البركاني تنطلق بعض الأكاسيد الكبريتية مثل: أكسيد الكبريت SO_2 إلى الهواء الجوي، وهذه الغازات تصل إلى الأرض مرة أخرى عن طريق مياه الأمطار، وكذلك يمكن للنبات امتصاص الكبريت على هذه الصورة (SO_2)، علما أنه إذا زاد تركيز هذه الغازات في الهواء الجوي عن حد معين، قد يؤدي إلى أضرار كبيرة بالنباتات النامية بهذه المناطق، خاصة إذا كانت هذه المناطق ممطرة: حيث تكون الأمطار حامضية التأثير ما يضر بالنباتات، وخير مثال على ذلك تلف مساحات واسعة من الغابات المتاخمة للمناطق الصناعية في أوروبا نتيجة لهذه الأمطار الحامضية (Taurop 1997).

وتُعدّ دورة الكبريت في الطبيعة دورة متوازنة في ظل الظروف الطبيعية المعتادة التي خلقها الله عزوجل، والتي لها فوائد متعددة كما في الشكل (8-4)، ما دامت في مجال الظروف الطبيعية التي

خلقها الله سبحانه وتعالى، وإن أي تغيير في هذه الظروف من قِبل الإنسان يؤدي إلى حدوث أضرار عدة، سواء بالبيئة، أو بالحيوان، أو بالإنسان.


The Sulfur Cycle
SO_4^{2-} in Soil and in Water
SO_2 / SO_3^{2-} in Soil, Water and Air
Plants
Animals
Thiobacillus
aerobic und anaerobic Microorganisms
Mikroorganisms Combustion
Desulfovibrio
H_2S in Soil, Water and Air
Sulfur Bacteria
S Mineral
FeS Minerals

الشكل (8-4): دورة الكبريت في الطبيعة.

ويُعدّ الكبريت من العناصر الأساسية اللازمة للكائنات الحية، ولا تفتقر التربة أو الكائنات الحية من نبات وحيوان إلى الكبريت، وتأخذ النباتات الخضراء الكبريت من الوسط الذي تعيش فيه على شكل أيونات الكبريتات (Sulfate SO4) وتستعمله في بناء البروتينات الخلوية، ومن خلال السلسلة الغذائية تستفيد الكائنات الحية الأخرى من هذه المركبات الكبريتية في بناء الخلايا (الغنيم وآخرون، 1996م).

دورة الأوكسجين

يوجد الأوكسجين في الهواء بشكل حر بنسبة 21%، ويوجد مذابًا في الماء بنسب متفاوتة أو متحدًا مع عناصر ومركبات معينة، وإن كمية هائلة من الأوكسجين يتم تكوينها بواسطة النباتات الخضراء بوصفها ناتجًا عرضيًّا من عملية البناء الضوئي، حيث تستهلك النباتات غاز ثاني أكسيد الكربون الذي يضاف إلى الهواء الجوي باستمرار من الإنسان والحيوان، وتستخدمه في عملية البناء الضوئي محررة غاز الأوكسجين الأساسي في عملية تنفس الكائنات الحية، وبهذه الدورة البسيطة يبقى جو الأرض حاويًا الكمية المناسبة من الأوكسجين وبشكل مستمر كما في الشكل (8-5)، وتطرأ على

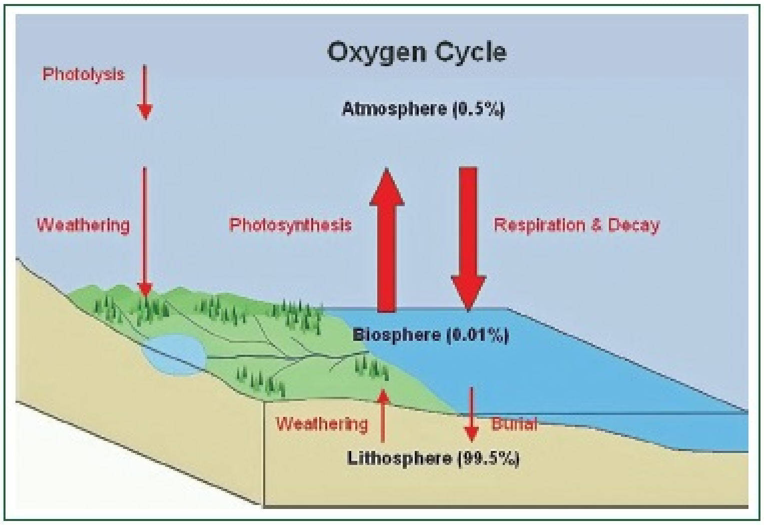
الأوكسجين تغيرات عدة في الطبقات العليا لجو الأرض، حيث يتحول جزيء الأوكسجين إلى الأوكسجين الذري أو إلى الأوزون، ويتوافر الأوزون في الطبقات العليا لغلاف الأرض، ويساعد ذلك على عملية امتصاص نسبة كبيرة من الأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس وعرقلة تدفقها إلى سطح الأرض إلا بكميات ضئيلة (Frases et. al. 2006, Hermann et. al. 1999, Meharg 2003).

ويسبب اختراق هذه الأشعة للغلاف الجوي بكميات زائدة إحداث طفرات في المادة الوراثية أو موت الكائنات الحية المتنوعة، وعندما يمتص الأوزون الأشعة فوق البنفسجية، فإنه يتحول إلى الأوكسجين تلقائيًّا، ومن ثم يحدث توازن طبيعي مستمر في طبقة الأوزون في الجو، ويمتص الأوزون ما نسبته نحو 99% من الأشعة فوق البنفسجية، وتصنف الأشعة فوق البنفسجية إلى ثلاثة أنواع:

1. الأشعة فوق البنفسجية A: هي أشعة ذات طاقة قليلة نسبيًّا، وتُعدّ الأقل خطرًا على صحة الإنسان وسلامته.

2. الأشعة فوق البنفسجية B: هي أشعة ذات طاقة أعلى، وتشكل خطرًا كبيرًا على صحة الإنسان وسلامته، وهنا يقوم حزام الأوزون بامتصاص القسم الأعظم منها، ويصل قسم بسيط من هذه الأشعة إلى سطح الأرض، ومن الجدير بالذكر أن لهذه الأشعة تأثيرًا إيجابيًّا في جسم الإنسان، إذ تكون فيتامين (د) ولكنها خطيرة جدًّا إذا تعرض الإنسان لها مدة طويلة.

3. الأشعة فوق البنفسجية C: هي أشعة ذات طاقة عالية جدًّا وخطرة جدًّا على صحة الإنسان وسلامته، ولحسن الحظ فإنه يتم امتصاصها من قِبل حزام الأوزون والغلاف الغازي كليًّا، والأوزون عبارة عن غاز يتكون من ثلاث ذرات من الأوكسجين، وهو شديد الأكسدة وذو رائحة نفاذة، ويميل لونه إلى الزرقة، ومن الجدير بالذكر أن غاز الأوزون هو الغاز الوحيد في الجو الذي يمنع وصول الأشعة فوق البنفسجية إلى الأرض، ويتكون غاز الأوزون في طبقة الستراتوسفير في الغلاف الجوي بواسطة تفاعلات ضوئية معقدة، وإن الأوكسجين المستخدم في عمليتي التنفس والاحتراق يمكن أن يرجع إلى الغلاف الجوي عن طريق عملية البناء الضوئي التي تقوم بها النباتات، ويؤدي التوازن الدقيق بين كمية الأوكسجين المسحوبة من الغلاف الهوائي وكمية الأوكسجين المضافة إليه إلى الحفاظ على نسبة الأوكسجين الثابتة بالغلاف الهوائي، التي تبلغ نحو عشرين في المئة.



الشكل (8-5): دورة الأوكسجين في الطبيعة.

وترتبط دورة الأوكسجين بدورة الكربون، إذ تقوم الكائنات الحية الهوائية بتنفس الأوكسجين وإطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون الذي تستعمله النباتات الخضراء في عملية التمثيل الضوئي، وبذلك تغلق الدورة، وببساطة تتمثل دورة الأوكسجين في أن هذا الغاز يمتص من البيئة خلال التنفس الهوائي، ويطلق إلى البيئة نتيجة للتمثيل الضوئي للنباتات (عبدالحافظ، 1998م).

يوجد أيضًا تبادل مستمر للأكسجين بين 20.9% في الجو، ومناطق الماء على الأرض كافة، وتكاد تكون الكمية الكلية للأكسجين في الغلاف الجوي ثابتة نسبيًا، وهذا يعني أن دورة الأوكسجين تكون مستقرة، غير أنه يمكن لتأثيرات التلوث أن تسبب نقصًا في الأوكسجين في بعض المواقع البحرية المحلية.

ونظرًا لأن كمية الأوكسجين في الهواء كبيرة، فإن التغيرات التي يمكن أن تطرأ على كميته في الهواء ليست لها أهمية بيئية كبيرة على النباتات، ولا يعاني المجموع الخضري للنباتات المعرضة للهواء من أي نقص في كمية الأوكسجين، ولكن يختلف الأمر بالنسبة إلى النباتات المائية وأجزاء النبات المطمورة في التربة؛ ذلك أن كمية الأوكسجين في هواء التربة أقل منها في الهواء الجوي، ويعود هذا إلى استهلاك أكسجين هواء التربة في عمليات تنفس المجموع الجذري للنباتات والكائنات الدقيقة وفي عمليات تحلل المادة العضوية الموجودة في التربة وغيرها، وينتج عن ذلك انخفاض تركيز الأوكسجين في هواء التربة كثيرًا؛ لذا نجد أن النباتات التي تعيش في البيئات الرطبة والنباتات المائية تمتلك بعض الخواص والقدرات التي أعطاها إياها الخالق سبحانه وتعالى لتمكنها من التغلب على نقص الأوكسجين في بيئتها.

وقد تبين للعلماء بتجارب دقيقة (عبدالحافظ، 1998م) أن الأوكسجين المنطلق في عملية البناء الضوئي ينتج من الماء، وأما الأوكسجين الذي يدخل في تكوين المواد الغذائية المتكونة فمصدره

ثاني أكسيد الكربون، وفي عملية التنفس -وهي عملية مضادة للبناء الضوئي- يدخل الأوكسجين بطريقة أو بأخرى إلى أجسام الكائنات الحية، فيؤكسد المواد الغذائية، وتتحرر الطاقة الحبيسة فيها، وينتج الماء وثاني أكسيد الكربون، وهما مادتان تخرجهما الأحياء خارج أجسامها في الغالب، والتنفس والبناء الضوئي عمليتان متضادتان تسهمان بشكل كبير في ثبات الهواء واتزانه، ولولا هذا التضاد لنفد الأوكسجين من الجو خلال 2000 عام وثاني أكسيد الكربون خلال 300 عام.

ومن جهة أخرى تُستهلك كميات كبيرة من الأوكسجين لتحقيق عمليات الاحتراق بما فيها وسائل النقل ذات المحركات الداخلية التي تضاعف استخدامها خلال القرن الحالي، ومن ثم تزايد استخدامها للأكسجين بكميات أكبر، وتستهلك الكرة الأرضية كمية هائلة من الأوكسجين، وهذه الكمية ليست أقل بكثير من تلك الكمية من الأوكسجين الناتجة عن عمليات البناء الضوئي أو من قبل البلانكتونات النباتية البحرية، وفي العصر الحالي يقوم الإنسان بأنشطة مختلفة تؤدي إلى تحطيم حزام الأوزون الواقي للأرض من أخطار الأشعة المدمرة، وذلك مثل أنشطة التفجيرات النووية والطائرات العسكرية النفاثة التي تصل إلى حزام الأوزون والمواد الكيميائية المختلفة، مثل أكاسيد النيتروجين والكلوروفورم وميثيل البروميد الذي يستعمل في تطهير التربة الزراعية ومركبات الكلور والفلور العضوية Chlorofluorocarbons (CFC) التي تسمى -تجاريًّا- الفريون.

دورة الماء

يُعدّ الماء أهم عنصر للحياة على سطح الأرض، فالنبات، والحيوان، والإنسان يعتمدون عليه اعتمادًا كليًّا للاستمرار في الحياة كما قال سبحانه وتعالى: {أَوَلَمْ يَرَ الَّذِينَ كَفَرُوا أَنَّ السَّمَاوَاتِ وَالأَرْضَ كَانَتَا رَتْقًا فَفَتَقْنَاهُمَا وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلاَ يُؤْمِنُونَ} [الأنبياء: 30]. والماء في الطبيعة على سطح الأرض أوجده الله سبحانه وتعالى في صور عدة، فإما أن يكون على صورة بخار في الهواء أو ماء سائل في الأنهار (الشكل 8-6) والبحيرات والبحار والمحيطات (الشكل 8-7) أو متجمد على هيئة جليد (الشكل 8-8) كما في القطبين.

الشكل (8-6): تدفق المياه على سطح الأرض.

الشكل (8-7): منظر لمياه البحر.

الشكل (8-8): المياه المتجمدة على هيئة كتل جليدية.

تقدر كمية الماء الموجودة في المحيطات بنحو 97% من كمية الماء على سطح الأرض، ويتبخر منها نحو 875 كم3 يوميًّا، ويعود 775 كم3 على هيئة أمطار أما الباقي فيكون على صورة بخار ماء متطاير في الهواء، إضافة إلى ذلك هناك 160 كم3 من الماء تتبخر يوميًّا من اليابسة نفسها، وتصعد إلى السماء على هيئة بخار ماء (عبدالمعطي، 1999م).

وجميع هذه الصور التي يُوجَد فيها الماء مسخرة لخدمة الإنسان بقدرة الله سبحانه وتعالى وبفضل منه وحده؛ حتى يتمكن من إعمار الأرض وعبادة الله وحده الموجد لها والقادر على ذهاب بها إذا شاء في أي وقت أو مكان يشاء ويقدر سبحانه جل في علاه، ولكل بيئة ما يناسبها من كائنات حية تتأقلم مع ظروفها البيئية، وتتكيف مع خصائصها بما يكفل معيشتها وتكاثرها في هذه البيئة أو تلك.

ولأهمية الماء بالنسبة إلى الكائنات الحية من إنسان وحيوان ونبات، فقد جعله الله أكثر المواد انتشارًا على سطح الكرة الأرضية، حيث إن ثلاثة أرباع سطحها مغطى بالماء، وترجع أهمية الماء للكائن الحي أولًا، من كونه مركبًا مهمًّا في جسم كل الكائنات الحية، فثلثا وزن أجسامها تقريبًا مكون من الماء، ولا يمكنها العيش من دون الماء، فالبيئة الداخلية للخلايا هي في الأساس بيئة مائية، والماء ضروري لتنفيذ العمليات البيوكيميائية التي تحدث داخلها، وفضلًا على ذلك، يساعد الماء على نقل المواد الذائبة داخل الخلية ومن مكان إلى آخر في الجسم.

وتجدر الإشارة هنا إلى أن توافر الماء للكائنات الحية الدقيقة لا يعتمد فقط على المحتوى المائي للبيئات المختلفة، بل يخضع أيضًا لعوامل أخرى مختلفة مثل الإدمصاص Adsorption والإذابة، وإلى أي مدى تكون قوة الإدمصاص أو تركيز العناصر الذائبة، وإلى قدرة الكائن الحي على التغلب على هذه العوامل مجتمعة واستخلاص هذا الماء بصورة ميسرة، ودور الخاصية الأسموزية والجهد المائي الكهربائي في عملية دخول وخروج السوائل من وإلى داخل الخلية وخارجها، فهي مهمة في حياة الأحياء الدقيقة بشكل خاص حتى تتمكن من الاستمرار في مزاولة نشاطاتها البيولوجية وبقائها على قيد الحياة في هذه البيئة أو تلك، وكما ذكرت سابقًا: إن نشاط الماء يكون أكثر ما يمكن في حال عدم وجود مواد مذابة فيه، والعكس نجد أنه يقل نشاط الماء كلما ارتفع تركيز المواد المذابة فيه، ومن أجل هذا نجد أن نشاط الماء في بيئات الأنهار أكبر منه في بيئات البحار، فالبحر الميت مثلًا لا تعيش فيه الكائنات الحية لارتفاع الأملاح فيه ما تسبب في قلة نشاط الماء، فتكون عاجزة عن الامتصاص وتموت، وكذلك الحال بالنسبة إلى العسل والعصائر المركزة ذات التركيز المرتفع من المواد المذابة، فعند تنمية كائن حي دقيق في محلول ذي نشاط مائي منخفض، فإنه يبذل مجهودًا إضافيًا لاستخلاص الماء من ذلك المحلول، وإلا فسوف يموت، وهذا يؤدي إلى بطء النمو وقلة الناتج من خلايا الكائنات الحية الدقيقة.

فالضغط الأسموزي للسيتوبلازم في خلايا الكائنات الحية الدقيقة يكون عادة مرتفعًا عن الوسط الخارجي بما يسمح بمرور الماء من الخارج إلى داخل الخلية من خلال الخاصية الأسموزية والجهد المائي الكهربائي التي تنظم وتتحكم في عملية دخول وخروج السوائل من وإلى داخل الخلية وخارجها؛ لذا كما ذكرت سابقًا، فإنه عند وضع خلايا الكائنات الحية الدقيقة في وسط ذي ضغط أسموزي (تركيز) أعلى من الضغط الأسموزي لسيتوبلازم الخلية الميكروبية، فإن الماء سوف يخرج من داخل خلية الكائن الحي إلى الوسط المحيط، ما يؤدي إلى انكماش الغشاء السيتوبلازمي، وتدخل خلية الكائن الحي في حالة بلزمة Plasmolysis وجفاف تنتهي بالموت نظرًا لخروج ما بها من ماء إلى الوسط الخارجي.

والكائنات الحية الدقيقة تختلف في درجة تحملها للضغط الأسموزي، فهناك أحياء دقيقة محبة للعيش في الضغوط الأسموزية العالية الناتجة عن ارتفاع تركيز السكر، وتسمى Osmophilic، وبعض الأجناس البكتيرية محبة للعيش في محاليل لها ضغوط أسموزية عالية ناتجة عن ارتفاع الملوحة تسمى Halophiles، كالجنس هالوباكتيريوم Halobacterium الذي يُفضل النمو في محاليل لا يقل تركيزها عن 15% من ملح كلوريد الصوديوم NaCl، وتوجد كائنات حية دقيقة محبة لتركيزات متوسطة من الملح تسمى Moderate halophiles وهي الأحياء التي تتطلب الملح لنموها، ولكنها لا تنمو في المحاليل المشبعة من الملح.

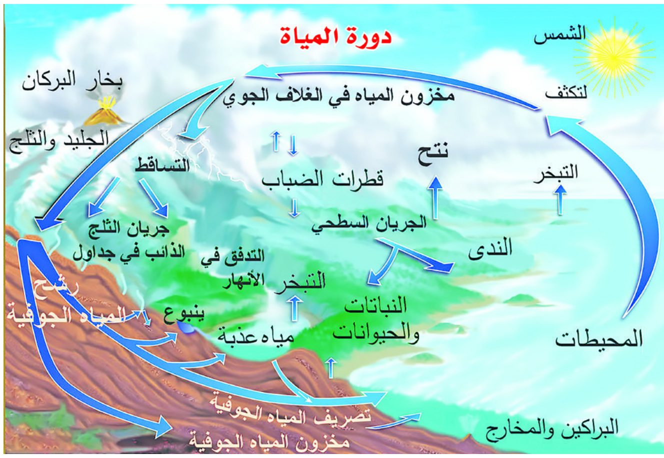
وتستهلك النباتات، والحيوانات، والإنسان الماء -الشكل (8-9)- الذي ما يلبث أن يعود إما على هيئة بخار كما هو الحال في عملية النتح والعرق والزفير وأبخرة المصانع،

أو سائل كما في مياه الصرف المنزلية والصناعية، وتعتمد كل هذه العمليات اعتمادًا مباشرًا على عناصر الطقس المختلفة من حرارة وضغط جوي ورياح وعمليات جريان الماء وتسربها إلى التربة، أو وصولها إلى الأنهار والبحار.

الشكل (8-9): نباتات نامية على ضفاف مجرى مائي.

وتجدر الإشارة هنا إلى أن المياه العذبة لا تزيد نسبتها على سطح الأرض على 3% فقط من مجمل كمية الماء الموجودة، وأن 98% من هذه المياه العذبة موجودة على صورة جليد في القطبين.

ويتميز الماء الموجود فوق سطح الأرض بالحركة الدائمة والدوران المستمر، وهذه الدورة الدائمة لمياه الأرض تسمى دورة الماء Water cycle أو الدورة الهيدرولوجية Hydrologic cycle كما في الشكل (8-10).



دورة المياة
الشمس
بخار البركان
مخزون المياه في الغلاف الجوي
لتكثف
الجليد والثلج
نتح
التساقط
قطرات الضباب
التبخر
الجريان السطحي
جريان الثلج الذائب في جداول
الندى
التدفق في الأنهار
التبخر
رشح المياه الجوفية
ينبوع
النباتات والحيوانات
مياه عذبة
المحيطات
تصريف المياه الجوفية
البراكين والمخارج
مخزون المياه الجوفية

الشكل (8-10): دورة الماء في الطبيعة.

وفي هذه الدورة تبدأ المياه بالتبخر عندما تسخن الأرض ولأن الهواء يصعد للأعلى عندما ترتفع درجة حرارته، فيصعد بخار الماء إلى طبقات الجو العليا، وحيث إن هذه الطبقات باردة، فإن البخار

يبدأ في التكثف ليشكل الغيوم، وهنا تبدأ قطرات الماء الموجودة في الغيوم بالاتحاد مع بعضها لتشكل قطرات أكبر، وهذه القطرات يزداد وزنها، وتصبح ثقيلة، بحيث لا يمكن للغيم أن يحملها، وإن هذه القطرات هي عبارة عن قطرات المطر التي تسقط على سطح الأرض بإذن الله ليذهب جزء منها إلى المياه السطحية كالبحار، والمحيطات، والأنهار، ويذهب الجزء الآخر إلى المياه الجوفية، وعندما ترتفع درجة حرارة الأرض تبدأ المياه السطحية في التبخر مرة أخرى، وهكذا تعاد العملية مرة أخرى، وهذا ما يسمى (دورة الماء في الطبيعة) أو (الدورة الهيدرولوجية) (عبدالمعطي، 1999م).

ومن الجدير بالذكر أن حركة بخار الماء في الجو وتشكل السحب ثم نزول المطر ليست عملية ميكانيكية بحتة تتم بطريقة تلقائية، بل هي ظاهرة كونية تدل على قدرة الله سبحانه وتعالى، فهو المتصرف في هذه الأمور كلها، حيث تسير السحابة بأمره وحده، وتتجمع السحب، وتتكاثف بأمره، وتتلبد السماء بالغيوم بعلمه وبسلطانه، بل لا تنزل قطرة واحدة من السماء إلا بعد أن يأذن لها رب العالمين، ويسوقها إلى الأرض التي أمرها أن تنزل فيها، وهذا المعنى ورد في آيات عدة نذكر منها ما يأتي:

يقول سبحانه وتعالى: {وَهُوَ الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيَاحَ بُشْرًا بَيْنَ يَدَيْ رَحْمَتِهِ حَتَّى إِذَا أَقَلَّتْ سَحَابًا ثِقَالاً سُقْنَاهُ لِبَلَدٍ مَيِّتٍ فَأَنْزَلْنَا بِهِ الْمَاءَ فَأَخْرَجْنَا بِهِ مِنْ كُلِّ الثَّمَرَاتِ كَذَلِكَ نُخْرِجُ الْمَوْتَى لَعَلَّكُمْ تَذَكَّرُونَ} [الأعراف: 57]. ويقول تبارك وتعالى: {وَهُوَ الَّذِي أَرْسَلَ الرِّيَاحَ بُشْرًا بَيْنَ يَدَيْ رَحْمَتِهِ وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً طَهُورًا} [الفرقان: 48]. وقال عزوجل: {وَأَرْسَلْنَا الرِّيَاحَ لَوَاقِحَ فَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَسْقَيْنَاكُمُوهُ وَمَا أَنْتُمْ لَهُ بِخَازِنِينَ} [الحجر: 22]. ويقول تبارك وتعالى: {وَاللَّهُ الَّذِي أَرْسَلَ الرِّيَاحَ فَتُثِيرُ سَحَابًا فَسُقْنَاهُ إِلَى بَلَدٍ مَيِّتٍ فَأَحْيَيْنَا بِهِ الأَرْضَ بَعْدَ مَوْتِهَا كَذَلِكَ النُّشُورُ }[فاطر: 9]. ثم ذكر الحي القيوم أنه وحده المتصرف في هذه العملية في قوله جلّ وعلا: {أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ يُزْجِي سَحَابًا ثُمَّ يُؤَلِّفُ بَيْنَهُ ثُمَّ يَجْعَلُهُ رُكَامًا فَتَرَى الْوَدْقَ يَخْرُجُ مِنْ خِلاَلِهِ وَيُنَزِّلُ مِنَ السَّمَاءِ مِنْ جِبَالٍ فِيهَا مِنْ بَرَدٍ فَيُصِيبُ بِهِ مَنْ يَشَاءُ وَيَصْرِفُهُ عَن مَّنْ يَشَاءُ يَكَادُ سَنَا بَرْقِهِ يَذْهَبُ بِالأَبْصَارِ}[النور: 43].

وامتن المولى سبحانه وتعالى على العباد بنزول هذا المطر، وما يصاحبه من إنبات لشتى أنواع الأشجار المثمرة بأصناف وأنواع الثمار من فواكه وخضراوات وحبوب وغيرها كما قال تبارك وتعالى: {وَأَنْزَلْنَا مِنَ الْمُعْصِرَاتِ مَاءً ثَجَّاجًا (14) لِنُخْرِجَ بِهِ حَبًّا وَنَبَاتًا (15)} [النبأ: 14-15].

وقال سبحانه وتعالى: {وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً بِقَدَرٍ فَأَسْكَنَّاهُ فِي الأَرْضِ وَإِنَّا عَلَى ذَهَابٍ بِهِ لَقَادِرُونَ (18) فَأَنْشَأْنَا لَكُمْ بِهِ جَنَّاتٍ مِنْ نَخِيلٍ وَأَعْنَابٍ لَكُمْ فِيهَا فَوَاكِهُ كَثِيرَةٌ وَمِنْهَا تَأْكُلُونَ (19)} [المؤمنون: 18-19].

وعندما يتحول الماء من سائل إلى بخار غير مرئي يسمى بخارًا، وتعرف عملية التحول بالتبخر، ويُعدّ بخار الماء من أهم المواد المكونة للغلاف الجوي؛ لأنه الأساس الذي تتوقف عليه معظم

الظواهر الجوية الناتجة عن التكاثف كالغيوم والأمطار....إلخ، ويتبخر الماء من المساحات المائية ومن التربة، وكذلك تُعدّ عملية النتح من النباتات والأشجار هي شكل من أشكال التبخر، حيث تطلق كميات كبيرة من بخار الماء، إضافة إلى تبخر كمية من الأمطار في أثناء سقوطها من الغيوم قبل أن تصل إلى الأرض.

ويُعدّ الإشعاع الكلي (الأرضي والشمسي)، ودرجة حرارة الهواء والسطح، وسرعة الريح عند سطح التبخر، والرطوبة النسبية قرب سطح التبخر، والضغط الجوي، وطبيعة السطح نفسه (يابسة، ماء... إلخ)، ومساحة سطح التبخر، ونوعية المياه، وعمق منسوب وكمية الماء في التربة، والارتفاع أو الانخفاض عن سطح البحر، كلها من العوامل التي تؤثر في كمية التبخر.

ويعرف معدل التبخر بأنه حجم الماء السائل الذي يتبخر من وحدة المساحات في وحدة الزمن أو سمك الماء مقيسًا بالملميتر الذي يفقده السائل بالتبخر في يوم كامل

(24 ساعة) من المساحة الكلية، وتعتمد الكمية الفعلية للمياه المتبخرة على نوعية التربة، وعلى الغطاء النباتي، ووفرة رطوبة التربة، وعمق طبقة المياه الجوفية، حيث ترتفع كميات التبخر في الصيف، بينما تقل في فصل الشتاء، وذلك بسبب تذبذب درجات الحرارة وسرعة الرياح، حيث إن سرعتها أعلى في فصل الصيف عن فصل الشتاء، إضافة إلى أن صفاء السماء في الصيف يسمح لأشعة الشمس بالوصول إلى سطح الأرض، ووجود الغيوم في السماء شتاءً لا يسمح للإشعاع الشمسي بالوصول إلى الأرض.

وتُعدّ الغيوم هي مصدر الأمطار والثلوج والحاجز الذي يؤثر في الإشعاع الشمسي والأرضي يوميًا، (الشكل 8-11) حيث تتألف السحابة من بلايين من القطرات الدقيقة من الماء ومن البلورات الجليدية العالقة التي تسبح بتأثير التيارات الهوائية الصاعدة والهابطة، والسبب في بقاء الغيوم سابحة في الجو وعدم سقوطها إلى الأرض بفعل الجاذبية هو دفع الرياح الصاعدة لها.

الشكل (8-11): سماء ملبدة بالغيوم.

إن جميع أنواع الغيوم تتكون نتيجة التغير في درجة حرارة ورطوبة الهواء الصاعد، وبحسب الطريقة التي يصعد بها، والارتفاع الذي يصله عند التبريد إلى درجة الندى.

أما المطر فهو عبارة عن جسيمات من الماء على شكل قطيرات صغيرة أو قطرات يصل قطرها إلى نصف ملم والكبيرة إلى 5 ملم.

وتمر عملية تشكل الأمطار في سلسلة من الحلقات المتصلة تعرف بدورة المياه، وتُعدّ عمليات التبخر والتكاثف وتسرب المياه إلى جوف الأرض أو الأنهار والمحيطات جزءًا من هذه الدورة، ما يسهم في إيجاد توازن في هذه الدورة؛ أي إن مجموع ما يسقط من أمطار، وثلوج، وبَرَد،... وغيرها من الأشكال، يساوي مجموع ما يتبخر من المحيطات والأنهار وغيرها.

وبعد عملية التبخر يصعد بخار الماء إلى الطبقات الجوية العليا ليستمر صعود الهواء الذي يحتوي على بخار الماء حتى تنخفض درجة حرارته إلى ما دون نقطة الندى، حيث يتكاثف بخار الماء على شكل سحب محملة بالجسيمات المائية التي تستمر في الزيادة في الحجم والوزن، ثم تسقط بتأثير عوامل عدة، منها: رطوبة الهواء المحيطة بالجسيمة، وطبيعة النويات، وتأثير الشد السطحي لغشاء القطيرة، وسرعة انتقال الحرارة الكامنة المنطلقة إلى الهواء.

والأمطار في جميع أنحاء المعمورة هي المصدر الرئيس لجميع الموارد المائية،

قال تبارك وتعالى:{وَفِي السَّمَاءِ رِزْقُكُمْ وَمَا تُوعَدُونَ} [الذاريات: 22]. فالأمطار هي المصدر الرئيس للمياه السطحية، والمياه الجوفية، ومياه العيون والآبار.

وتُعدّ دورة الماء في الطبيعة التي طبع الله سبحانه وتعالى عليها الكون وتغيراته من حالة إلى أخرى من أهم ظواهر الطبيعة التي ترتبط بتغير درجة الحرارة، ولهذه الظاهرة دور مهم في حياة الإنسان، والنبات، والحيوان، ويمكن تلخيص التغيرات التي تحدث في هذه الظاهرة فيما يلي:

1. يتبخر الماء من البحار والمحيطات بتأثير حرارة الشمس.

2. يصعد البخار إلى الأعلى بسبب صغر كثافته (مقارنة بالهواء الجوي).

3. عندما يصل بخار الماء إلى طبقات الجو العليا -وهي منطقة باردة جدًّا- يتكثف، فيتحول إلى قطرات مائية صغيرة جدًّا (لا يمكننا رؤية القطرة الواحدة منها بالعين المجردة، لكننا يمكننا رؤية مجموعات منها على هيئة سحب بيضاء).

4. وتحمل الرياح هذه السحب من مكان لآخر وفق نظام إلهي دقيق محكم.

5. حتى إذا مرت تلك السحب على منطقة جوية باردة، وتهيأت لها فرصة -بأمر الله- وتجمعت تلك القطرات في المجموعات تؤلف كل واحدة منها قطرة ماء، فتسقط نحو الأرض.

الفصل التاسع

الأشنات Lichens

- ◄ تركيب الأشنات.
- ◄ أشكال الأشنات.
- ◄ التراكيب الخضرية.
- ◄ البناء الضوئي.
- ◄ العلاقات التكافلية والبناء.
- ◄ الأشنات وتلوث الهواء.

الفصل التاسع

الأشنات Lichens

الأشنات هي عبارة عن علاقة تكافلية بين فطر وطحلب يجتمعان في تركيب يسمى الثالوس Thallus، والثالوس هو جسم نباتي غير متمايز إلى ساق وأوراق، ويفتقر إلى الجذور الحقيقية وأوعية النقل والتوصيل، فالتعضي في النباتات Stratification هو التنظيم في بناء أجسامها، ويبدأ من الكائنات وحيدة الخلية مثل البكتيريا والخميرة، ثم يتجمع عدد من الخلايا المتشابهة في التركيب والوظيفة لتكون مستعمرة بدائية Colony مثل طحلب الباندورينا Pandorina(16 خلية)، ثم تأتي المستعمرة الراقية المكونة من عدد كبير من الخلايا التي تختلف في أشكالها ووظائفها مثل طحلب الفولفكس Volvox، ثم يأتي بعدها الثالوس المكون من طبقات مختلفة في التركيب والوظيفة بها خلايا عدة متخصصة، ولكنها لا تكون أنسجة، ثم النباتات الراقية المكونة من أنسجة وأعضاء وأجهزة متمايزة لكل منها وظيفة متخصصة كالساق، والأوراق، والجذور. فالثالوس الأشني هو عبارة عن جسم نبات خضري يتركب من كائنين حيين، وهما: المكون (المتكافل) الفطري Mycobiont = Fungal Component الذي يكون من الفطريات الزقية Ascomycetes أو الفطريات البازيدية Basidiomycetes التي نجحت في تكوين علاقة تكافلية مع الطحالب الخضراء Chlorophyta = Green algae أو مع البكتيريا الزرقاء (السيانية) Cyanobacteria التي هي المكون (المتكافل) الطحلبي Phycobiont = Algal Component.

وعندما تجتمع هذه المكونات المختلفة يشكل الثالوس الناتج كائنًا حيًّا متميزًا، الذي يبدو كأنه نبات متميز لا يحمل أيًّا من صفات الفطريات أو الطحالب اللاشنية، ويمكن التعرف إلى المكونات الفطرية والطحلبية، وذلك بعمل قطاعات في الثالوس وفحصها تحت المجهر، وتتميز الأشنات بشكل عام باحتوائها على ثالوس أكثر تنظيمًا من الفطريات الزقية اللاأشنية، وتنتج تراكيب خضرية غير معروفة في الفطريات الأخرى، وفي عام 1803م أطلق العالم السويدي إريك أركارس Eric Archarus الذي يُعدّ أبا علم الأشنات مصطلح السوريدات Soredia والأيسيدات Isidia والسيفيلات Cyphellae على بعض هذه التراكيب الفريدة (Fraenkel et. al. 1988, Hentzer et. al. 2003, Moree et. al. 2012).

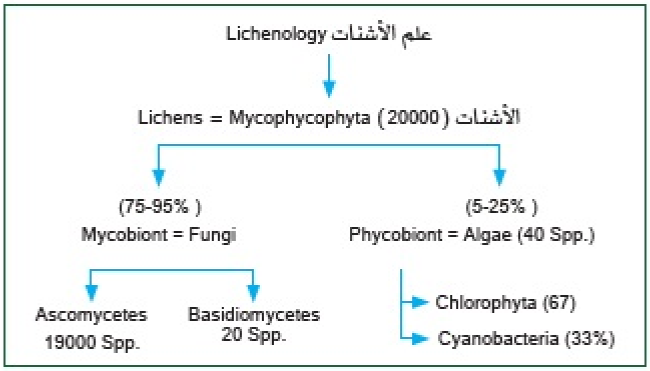
وعلم الأشنات Lichenology هو علم متفرع عن علم النبات Botany، وقد بدأ العلماء في دراسة الأشنات منذ أواخر القرن الثامن عشر الميلادي، فقد تم رصد ودراسة الكثير منها، حيث تم التعرف إلى قرابة تسعة عشر ألف نوع من

الأشنات (20000) Mycophycophyta، فالأشنات عبارة عن علاقة بين الفطريات بوصفها عائلًا Host والطحالب الخضراء والبكتيريا الزرقاء بوصفها متكافلًا Symbiont، ونحو 8% من

سطح الأرض يحمل الأشنات بوصفها غطاءً خضريًا سائدًا، ويختلف مظهر الثالوس الأشني الطبيعي عن مظهر مكوناته عندما تعزل في مزارع.

ويعتمد تقسيم الأشنات اعتمادًا كبيرًا على الصفات الفطرية، حيث يشكل المكون الفطري Mycobiont نسبة تتراوح فيما بين 75-95% من الثالوس الأشني

(الشكل 9-1)، بينما يشكل المكون الطحلبي Phycobiont نسبة تتراوح فيما بين 5-25 % فيوجد نحو 19000 نوع من الفطريات التي تكون الأشنات وكلها من الفطريات الزقية Ascomycetes، ما عدا نحو 20 نوعًا من الفطريات البازيدية Basidiomycetes، وقليل من الفطريات التي تكون الأشنات توجد حرة المعيشة، وفي المقابل هناك أربعون جنسًا من الطحالب والبكتيريا الزرقاء وحيدة الخلية أو خيطية بسيطة تكون متكافلة في الأشنات، وتشكل منها الطحالب الخضراء Chlorophyta نسبة 67% والبكتيريا الزرقاء Cyanobacteria نسبتها 33% وغالبًا يوجد نوع واحد فقط من المتكافل في الأشنات، وفي بعض الأنواع القليلة يوجد نوعان، التي في الغالب تكون طحلبًا أخضر وبكتيريا زرقاء، وقد وصف حتى الآن نحو 20000 نوع من الأشنات.


علم الأشنات Lichenology
Lichens = Mycophycophyta (20000) الأشنات
(75-95%)
Mycobiont = Fungi
(5-25%)
Phycobiont = Algae (40 Spp.)
Ascomycetes
19000 Spp.
Basidiomycetes
20 Spp.
Chlorophyta (67)
Cyanobacteria (33%)

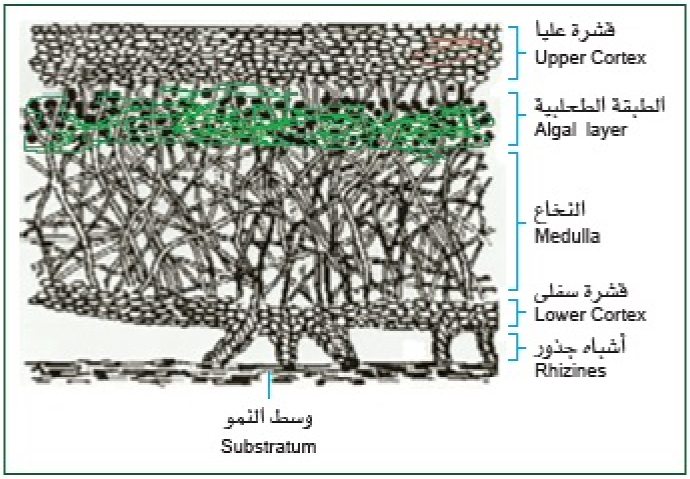
الشكل (9-1): تقسيم الأشنات بين المكون الفطريMycobiont والمكون الطحلبي Phycobiont.

تركيب الأشنات Lichens structure

جسم الأشنة عبارة عن ثالوس يشترك في تركيبه فطر وطحلب (الشكل 9-2)، ويُسمى الفطر المكون الفطري Mycobiont والطحلب يسمى المكون الطحلبي Phycobiont، ولمعرفة تركيب الثالوس الأشني فلا بد من دراسة كل مكون على حدة، وهذا يتطلب دراسة تشريحية وفسيولوجية ومورفولوجية لكل من الفطر والطحلب المتكافلين في بناء جسم الأشنة.

وغالبًا يكون المتكافل خارج خلايا العائل، وفي الغالبية العظمي من الأشنات تكون نسبة المتكافل فيما بين 5 إلى 25% من حجم أو كتلة الأشنة، بينما يكون العائل من 75 إلى 95%، وتتنوع

التراكيب في الأشنات، فمنها ما يعرف بالتركيب متباين الطبقات Heteromerous Structure وفيه يتركب الثالوس الأشني من قشرة عليا Upper Cortex وهي طبقة كثيفة من الخيوط الفطرية المضغوطة التي تكون نشطة أيضيًّا، ومن طبقة طحلبية Layer Algal تكون تحت القشرة العليا مباشرة وفيها يوجد المتكافل الطحلبي، ويتخللها خيوط فطرية متفرعة، بينما يكون النخاع Medulla تحت طبقة المتكافل، وهو طبقة سميكة نوعًا ما من الخيوط الفطرية سميكة الجدر المخلخلة التي يوجد بينها فراغات هوائية كثيرة، وفي معظم الأنواع يكون للفطر قشرة سفلية Lower Cortex وأشباه جذور أشنية Rhizines كما في أشنة Xanthoria، وهناك ما يعرف بالتركيب المتجانس Homoiomerous Structure وهذا النوع يوجد في أعداد قليلة من الأشنات التي تحتوي غالبًا على البكتيريا بوصفها متكافلًا، بحيث لا يحدد المتكافل في طبقة معينة، ولكنه ينتشر في كل الثالوس (Hogan et. al. 2004).



الشكل (2-9): تركيب الثالوس الأشني.

ومن الجدير بالذكر أن طبيعية الاتصال بين العائل والمتكافل تختلف باختلاف نوع المتكافل والبيئة، وباختلاف تعقيد تركيب الأشنات، ولكن هناك أربعة أنواع رئيسة من الاتصال أو الممصات Haustoria، فقد تكون الممصات على شكل بروزات شبه قدمية Peg–Like، وهي بروزات من الخيط الفطري تشبه القدم التي لا تخترق الجدار الخلوي ولا الغشاء الخلوي، وهناك الممصات الداخل خلوية Intracellular Haustoria، وهي بروزات من الخيوط الفطرية تخترق الجدار الخلوي، ولا تخترق الغشاء الخلوي، أو الممصات الضمن جدارية Intraparietal Haustoria، وهي بروزات صغيرة لا تخترق الجدار الخلوي، وهذه من صفات الأشنات القشرية الصغيرة، إضافة إلى الحويصلات والأنيبيات الدقيقة Vesicles and Microtubules حيث يتصل الخيط الفطري بخلية المتكافل، وهذه من خواص الأشنات الورقية والشجرية.

أولًا: المكون الفطري Mycobiont

في المكون الفطري Mycobiont أو التركيب الفطري The fungal component نجد أن العنصر الأساسي الفطري هو الخيط Hypha إلا أن التركيب الدقيق لخلية الفطر الأشني لم تدرس بالتفصيل كما هو الحال في الفطريات اللا أشنية، ويتكون الجدار الخلوي من طبقتين: إحداهما تكون على هيئة صفائح متعددة Multilaminate والأخرى حبيبية Granular التي تختلف في النفاذية الإلكترونية، وهذا يكون محاطًا بطبقة خارج خلوية من ألياف سكريات متعددة Polysaccharide Fibers أكثر سماكة من الفطريات اللاأشنية، ويمكن أن توجد فيه بكتيريا أو مواد أشنية مغمورة تهاجر في النهاية إلى السطح، وتحتوي الخلايا الفطرية على فجوات كثيرة، ويوجد في الغشاء البلازمي انثناءات إلى الداخل.

ويوجد في الخلية الفطرية العضيات العادية مثل نواة أو أكثر والميتوكوندريا وعدد من الريبوسومات، إلا أن عدد الكروموسومات في الأشنات غالبًا قليل، حيث يتراوح من 6 في جنس هيوتيا Huitia إلى 6 أو 8 في جنس ديرماتوكاربون Dermatocarpon، وهناك عضية واحدة تعرف بالأجسام متحدة المركز Concentric bodies وهي عبارة عن أجسام بروتينية يتراوح قطرها ما بين 300-400 نانوميتر تنتشر في البروتوبلاست، ويبدو أنها أكثر شيوعًا في الفطريات الأشنية منها في الفطريات اللا أشنية.

وخيوط الفطر الأشني تشبة خيوط الفطريات اللا أشنية، حيث تكون مقسمة بجدر عرضية Septa وتحتوي على ثقوب حاجزية Septal pores في الجدر العرضية، وتحتوي على أجسام وورونين Woronin، المحاطة بغشاء والمرتبطة مع الجدار العرضي Septum، وخيوط الثالوس التكافلي تكون متغيرة المظهر بشكل كبير، وتتحور بحسب مكان وجودها، حيث إن خيوط القشرة تحتوي على طبقات مضغوطة (كثيفة) من السكريات المتعددة الملتحمة مع بعضها، بينما تكون خيوط النخاع والطبقات الطحلبية رفيعة غير متراصة.

طبقة القشرة Cortical layer

تعمل القشرة بوصفها غطاء حماية حول سطح الثالوس، كما تفعل البشرة في النباتات الخضراء، إلا أنه لا يوجد فيها أدمة، ولا ثغور، وتقوم بالتدعيم وتبادل الغازات، وهناك أنواع عدة من القشرة، التي منها:

1. القشرة التي تتألف من طبقة جيلاتينية (غروية) مضغوطة ذات طبقات عدة من الخلايا، وهي أكثر طبقات القشرة شيوعًا، وفي الأجناس الكبيرة مثل الستراريا Cetraria والبارمليا Parmelia واليوسنيا Usnea ومعظم الأشنات القشرية Crustose Lichens يوجد طبقة عليا Upper Cortex وطبقة قشرة سفلى Lower Cortex.

2. قشرة ذات طبقتين من الخلايا في بعض الأنواع.

3. قشرة ذات طبقة واحدة من الخلايا،كما في جنس ليبتوقيم Leptogium التي هي أشنة جلاتينية تحتوي على بكتيريا زرقاء، حيث اختزلت القشرة إلى طبقة واحدة من الخلايا.

4. قشرة متحورة بشكل كبير، حيث تحتوي على طبقة بارانشيمية باليسيدية Palisade Paranchyma مغطاة بقشرة خارجية Epicortex، التي هي غلاف من سكريات متعددة لا خلوية تحتوي على عدد من الثقوب بقطر10-20 ميكرونًا، وقد وجدت في بعض الأنواع.

النخاع Medulla

يتألف جسم الثالوس الأشني من نسيج نخاعي قد يصل سمكه إلى 500 ميكرون، والخيوط الفطرية تكون جيلاتينية (غروية) ضعيفة مقارنة بخيوط القشرة، وتحتوي على تجاويف كبيرة، والخيوط الفطرية تكون متشابكة ومتشعبة بشكل مفكك على هيئة طبقة قطنية أو ليفية، والنخاع لديه سعة مائية أكبر، وهو موقع تخزين المانيتول Mannitol ومعظم المواد الأشنية التي تملأ الخيوط، وفي بعض الأنواع القليلة من الأشنات لا يوجد فيها قشرة سفلية تحمي النخاع؛ ولذا يبدو النخاع كطبقة ليفية بيضاء، وفي الأشنات القشرية يتغلغل النخاع بين بلورات الصخور أو البشرة الخارجية من اللحاء مثبتًا الثالوس بقوة بوسط النمو.

ثانيًا: المكون الطحلبي Phycobiont

في المكون الطحلبي Phycobiont أو التركيب الطحلبي The Algal component نجد أن خلاياه تكون محاطة بجدار خلوي سميك، يتألف الجدار الخلوي في جنس تريبوكسيا Trebouxia من ثلاث طبقات، تتكون الطبقة الخارجية والداخلية من سكريات متعددة Polysaccharides، بينما تتكون الطبقة الوسطى التي سماكتها نحو 150 نانوميترًا، من سبورو بولنين Sporo pollenin الذي يُعتقَد أنه يحمي الخلية من الجفاف، وإنه مقاوم لاختراق الممصات الفطرية، وداخل الجدار الخلوي يوجد عضيات حيوية هي النواة والأجسام الحويصلية والريبوسومات والبلاستيدات الخضراء Chloroplasts ذات الصفائح من الثيلاكويدات Thylakoids، إضافة إلى المركز النشوي Pyrenoid الذي لا يحتوي على غلاف نشوي.

التنظيم الطحلبي Algal Organization

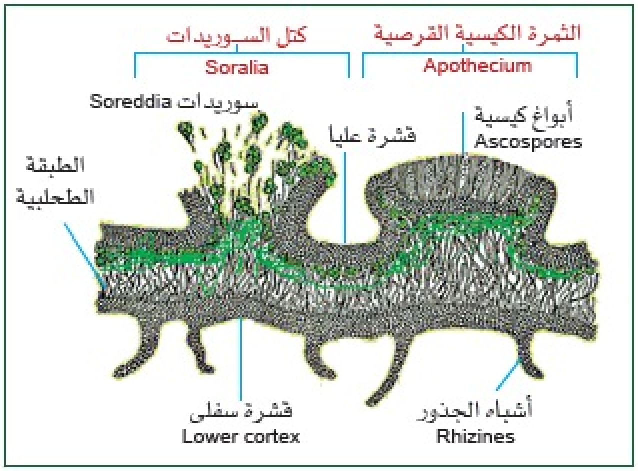
يوجد أربعة أنواع من التراكيب أو التنظيم الطحلبي في الثالوس الأشني، وهي:

1. التركيب متباين الطبقات Heteromerous or Stratified، حيث تكون الطحالب الأشنية محاطة تمامًا بنسيج فطري من الثالوس، وغالبًا ما تكون محصورة في طبقة مميزة ومستمرة إلى حد ما تحت القشرة العليا مباشرة وفوق النخاع، ويتراوح سمك هذه الطبقة ما بين 10-30 ميكرونًا.

2. التركيب متماثل الطبقات Homoiomerous، في بعض أنواع الأشنات ينتشر الطحلب في الثالوس؛ أي لا يكون محددًا بمنطقة معينة.

3. الأشنات الجيلاتينية التي لا تتميز إلى الطبقات الداخلية يمتزج المكون الطحلبي الذي هو طحلب النوستك Nostoc مع الخيوط الفطرية المتشعبة المتفككة، وفي هذه الحالة يسهم الطحلب بشكل كبير في لون وشكل وتكوين الثالوس أكثر من الفطر.

4. بعض الأشنات الخيطية تتركب غالبًا من الطحالب الخيطية مع غطاء رفيع من الخيوط الفطرية، ولكنها ما زالت تُعدّ أشنات بدلًا من كونها طحالب حرة المعيشة؛ وذلك لأن الجسم الثمري الزقي الكأسي Apothecium ينتج في النهاية (الشكل 9-3).


الثمرة الكيسية القرصية
Apothecium
كتل السوريدات
Soralia
أبواغ كيسية
Ascospores
قشرة عليا
Soreddia سوريدات
الطبقة الطحلبية
أشباه الجذور
Rhizines
قشرة سفلى
Lower cortex

الشكل (9-3): الثمرة الكيسية القرصية Apothecium في الثالوس الأشني.

أشكال الأشنات Lichen forms

تقسم الأشنات عادة إلى خمسة أشكال، وهي: القشرية، والحرشفية، والورقية، والخيطية، والشجيرية كما في الشكل (9-4)، وهذا التقسيم يكون من الثالوس البدائي إلى الثالوس المتطور التركيب مع وجود أنواع عدة وسطية مثل الخيطية والحرشفية، وكل شكل من هذه الأشكال يتميز بتنظيم معين لكل من أنسجة القشرة والأنسجة الطحلبية وأنسجة النخاع إضافة إلى طريقة اتصالها بوسط النمو Substratum، حيث يتم تقسيم الأشنات بناءً على شكلها المورفولوجي الظاهري وتركيبها البنائي إلى الأشكال الآتية:

الأشنات القشرية Crustose Lichens

تقسم الأشنات القشرية إلى مجموعتين رئيستين هما:

- الأشنات القشرية البدائية Leprose

هي أبسط أنواع الأشنات القشرية ينقصها التنظيم الثالوسي، وتتكون من حصيرة خيطية وسطية تحيط وتغلف مستعمرات طحلبية، مثل أشنة القشرة الدقيقة ليبراريا Lepraria التي توجد على الصخور، وقد تنمو الحصيرة الفطرية والطحالب المرتبطة معها بين بلورات الصخور تحت سطح الصخرة مباشرة؛ ولذا تعرف بالأشنات الداخل صخرية Endolithic Lichens، وبعض الأنواع تنمو بين خلايا الفلين على جذوع الأشجار، وتعرف بالداخل فلينية Hypophloeodal وتتكون الأجسام الثمرية الكيسية على سطح وسط النمو.

- الأشنات القشرية الراقية Crustose

الغالبية العظمى من الأشنات القشرية الراقية تنمو على سطح الصخر والأشجار، وتحتوي على ثالوس مميز يتألف من قشرة عليا وطبقة طحلبية ونخاع مختلف السماكة الذي يتغلغل بين طبقات الصخور أو البشرة الخارجية مثبتًا الأشنة بقوة بوسط النمو (شكل 9-4)، كما في ليكانورا Lecanora ودبلوسيشتس Diplo schists.

ويوجد الطحلب الأخضر الخيطي ترينتيبوليا Trentepolia بوصفه مكونًا طحلبيًّا في الأشنات القشرية crustose (مثل: قرافيس Graphis وأوبيقرافا Opegrapha وأرثونيا Arthonia) ولكن التركيب الخيطي قد تحور كثيرًا، ووُجِد أيضًا الطحلب وحيد الخلية بلوروكوكص Pleuro coccus في أجناس قشرية عدة.

2. الأشنات الخيطية Filamentous Lichens

الأشنات الخيطية هي التي يكون شكل ثالوسها خيطيًّا، وفي بعض الأنواع يتكون معظم الثالوس من الطحالب الخيطية.

3. الأشنات الحرشفية Squamulose Lichens

فيها يتكون الثالوس من تراكيب تشبه الفصوص، ويوجد فيها قشرة عليا وطبقة طحلبية ونخاع، ولكن تنقصها القشرة السفلية وأشباه الجذور الأشنية الريزينات Rhizines كما في Psora وDermatocarpon.

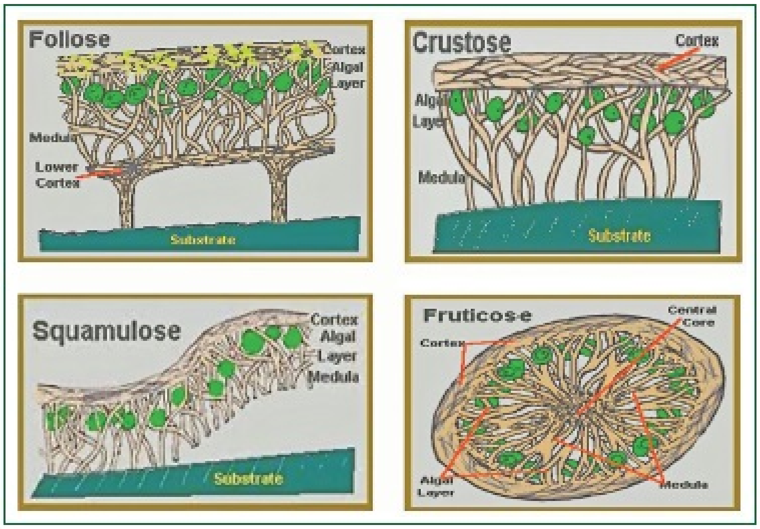
4. الأشنات الورقية Foliose Lichens

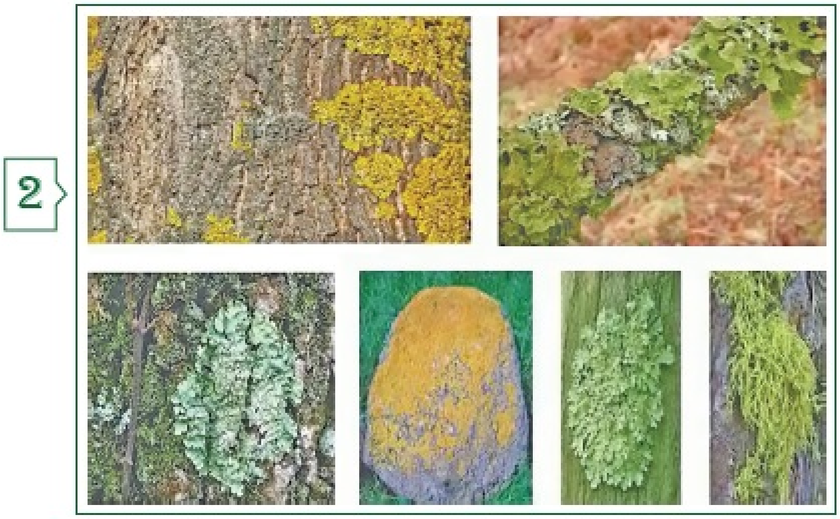
شكل الثالوس يشبه الورقة، ويختلف عن الشكل القشري بكونه ظهريًّا ذا سطح علوي وسفلي متميزين، ويكون حرًّا من الوسط المغذي، ولكنه غالبًا يتصل به بواسطة أعضاء خاصة تعرف

بأشباه الجذور الأشنية Rhizines ويكون الثالوس مقسمًا إلى فصوص متفرعة كما في زانثوريا Xanthoria وسيتراريا Cetraria وهيتروديميا Heterodermia.

5. الأشنات الشجيرية Fruticose Lichens

الأشنات الشجيرية يكون فيها شكل الثالوس على هيئة شجيرية قائمة أو متدلية أو خيوط تشبه الشعر، وتتراوح أحجامها من الصغيرة جدًّا مثل الكلادونيات Cladonias حيث يكون ارتفاعها من 1-2 مليمتر إلى الطويلة مثل يوسنا Usnea حيث يبلغ طولها خمسة أمتار، ويكون التركيب الداخلي شعاعي الشكل ذا قشرة خارجية كثيفة وطبقة طحلبية رفيعة ونخاع وتجويف مركزي (محور axis) كثيف، وقد يكون الثالوس مستديرًا أو مسطحًا، وغالبًا يكون كثير التفرع، وتثبت الأشنات الشجيرية بواسطة أشرطة قاعدية شبة جذرية تخرج من القشرة إلا أن عددًا من الأنواع لا تتصل بوسط النمو (شكل 9-4)، وبعض أشنات التربة السائدة مثل Cladonia تكون تراكيب شجيرية شبه قدمية مجوفة تحمل ثمرة كيسية كأسية Apothecium تعرف بــ Podetia. الشكل (9-4).


1
Follose
Cortex
Algal Layer
Medula
Lower Cortex
Substrate
Crustose
Cortex
Algal Layer
Medula
Substrate
Squamulose
Cortex
Algal Layer
Medula
Substrate
Fruticose
Central Core
Cortex
Algal Layer
Medula



الشكل (4-9): أشكال الأشنات المختلفة.

تنتشر الطحالب الخضراء التريبوكسية Green Trebouxioid algae بكثرة في الأشنات الورقية Foliose والشجيرية Fruticose، وقد وجد أحد العلماء أن نحو 83% من الأشنات في إسكندنافيا تحتوي على هذا النوع، وهناك كثير من البكتيريا الزرقاء مثل النوستك Nostoc، وسيتوينما Scytonema، وسيتوقونيما Stigonema، وكولوثريس Colothrix، وهيفومورفا Hyphomorpha توجد كمكونات طحلبية في الأشنات الجلاتينية السوداء أو البنية الغامقة، وفي بعض الأنواع ذات الثالوس متباين الطبقات.

والتعرف الدقيق إلى الطحلب في الثالوس الأشني الطبيعي يكون عادة صعبًا أو مستحيلًا؛ وذلك لأن الشكل الطحلبي قد حور بواسطة الفطر، وغالبًا تتكسر الأشكال الخيطية إلى خلايا مفردة، إضافة إلى أن المراحل في دورة الحياة، وخاصة تكوين الأبواغ تتوقف في أثناء التكافل، وللتعرف الصحيح يجب أن تعزل الطحالب من الثالوس الذي تم جمعه حديثًا، وتزرع في مزارع خالية من الفطر، ومن الصفات المهمة للتعرف إلى المكون الطحلبي:

1. شكل الخلية.
2. حجم الخلية.
3. سمك جدار الخلية.
4. وجود أغشية هلامية.
5. عدد الأنوية.
6. طريقة انقسام الخلية.

وفيما يتعلق بالتخصصية في الطحالب الأشنية Specificity of lichen algae نجد أن الطحالب الأشنية تتميز بأنها غير متخصصة بشكل عام، وذلك على مستوى النوع، حيث يمكن أن يوجد نوع واحد بوصفه متكافلًا طحلبيًّا لأشنات عدة غير متقاربة تصنيفًا، ومع أن معظم الأشنات تحتوي على

نوع واحد من الطحلب المتكافل، إلا أن بعض الأنواع تحتوي على طحلبين مختلفين مثل الطحلب الأخضر تريبوكسياTrebouxia في الطبقة الطحلبية وبكتيريا زرقاء مثل النوستك Nostoc في تراكيب خاصة داخلية أو خارجية تعرف بسيفالودات Cephalodia.

وتتكاثر الطحالب الأشنية Reproduction في الثالوس الأشني بإحدى ثلاث طرق مختلفة، منها:

1. في البسيدوتريبوكسيا Pseudo trebouxia، تنقسم الخلية إلى 2-16 بوغًا غير متحرك Aplanosporesالتي تنطلق من الخلية الأم، وهذه في الواقع تُعدّ أبواغًا حيوانية ساكنة Arrested Zoospores.

2. وفي التريبوكسيا Trebouxia، تتكاثر فقط بواسطة الأبواغ الحيوانية في المزرعة Zoospores.

وفي الطحالب الأشنية الأخرى، يتم التكاثر عن طريق الانقسام الميتوزي Mitosis الخضري وتكوين خلايا ساكنة Akinets أو أبواغ غير متحركة Aplanospores أو الأبواغ الحيوانية Zoospores.

التراكيب الخضرية Vegetative Structures

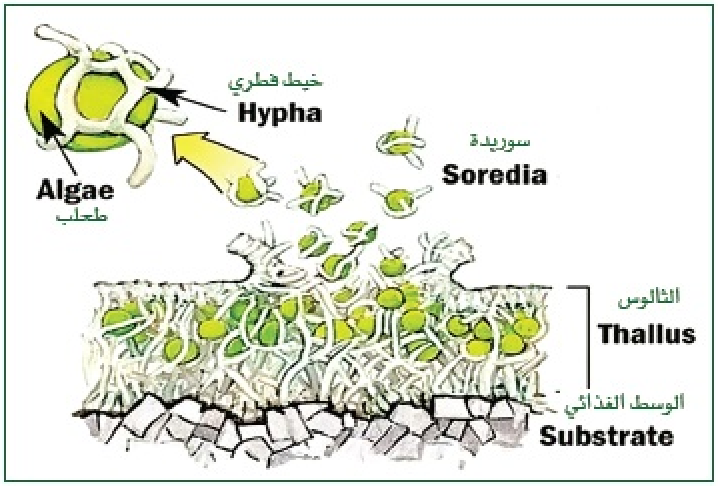
تتميز الأشنات بوجود كثير من التراكيب الخضرية المختلفة بعضها توجد في كل من الأشنات والفطريات مثل أشباه الجذورRhizines، واللباد Tomentum، والأهداب Cilia.

والبعض الآخر لا يوجد إلا في الثالوس المركب مثل السوريدات Soredia، والإيسيدات Isidia، والحويصلات الهرمية Hormocysts، والفصيصات Lobules، والسيفيلات (الفتحات) Cyphella، والسيفيلات الكاذبة Pseudo cyphellae، والسيفالوديات Cephalodia، التي لا تنتج لا في الفطريات ولا في الطحالب اللاأشنية ولا في الفطريات الأشنة المعزولة، وهي عبارة عن نواتج فريدة للثالوس الأشني المركب، وكثير من هذه التراكيب تعمل بوصفها أعضاء تكاثر خضري تعرف بالأبواغ المزدوجة الخضرية Vegetative Diaspores أو بوصفها أعضاء انتشار، وبعضها يُعتقَد أن لها وظائف فسيولوجية.

1. السوريدات Soredia

السوريدات هي عبارة عن تجمع غير قشري منفصل تتركب من خلايا طحلبية قليلة محاطة بخيوط فطرية كما في الشكل (5-9) ويتراوح قطر السوريدة الواحدة من 25-100 ميكرون، ولكنها تزداد في الحجم عندما يتماسك كثير منها مع بعض بشكل كتل محببة كبيرة، وتنشأ السوريدات في النخاع والطبقة الطحلبية بعد مدة النمو المزدهر للطحالب، وتطلق عبر الفتحات أو الشقوق في القشرة.

وكل الثالوس في الأشنات القشرية البدائية Leprose يتكون أساسًا من طبقة مستمرة من السوريدات المتحدة، وتعرف كتل السوريدات المطلقة بالسورالات Soralia، وطريقة تنظيمها على الثالوس مهمة في تمييز الأنواع الأشنية، وهي أكثر الأنواع شيوعًا في الأشنات الورقية والشجيرية ونادرة الوجود في القشرية، كما في ليبراريا Lepraria، وبارميليا Parmelia.



الشكل (9-5): تركيب السوريدة في الثالوس الأشني.

2. الأيسيدات Isidia

الأيسيدات هي عبارة عن نموات خارجية من القشرة العليا، وهي تشبه الأصابع

أو الأسطوانات في الشكل، وفيها تكون الأنسجة الفطرية والطحلبية مندمجة مع بعض إلى حد ما، وتُعدّ جزءًا من الثالوس، مع أنها تعمل أساسًا بوصفها أعضاء تكاثر خضري، إلا أنها تزيد من مساحة السطح ما يزيد من قدرة الثالوس على التمثيل الأيضي، ومن 25-30% من أنواع الأشنات الورقية والشجيرية يوجد فيها أيسيدات، لكنها نادرة الوجود في الأشنات القشرية.

3. الحويصلات الهورمية Hormocysts

هي تراكيب فريدة تبدأ بالتكون بوصفها شعيرات طحلبية قصيرة عدة محاطة بغلاف جيلاتيني تغزوها الخيوط الفطرية، وعندما يتم تكوينها تنفصل هذه التجمعات مع الخيوط المتصلة بها، وتطلق عندما تتمزق الحافظة الحويصلية الهورمية Hormocystangia كما في لمفوليما Lempholemm.

4. الفصيصات Lobules

الفصيصات يقصد بها النموات غير العادية (الطارئة) من الثالوس الأشني، وغالبًا تنشأ على حواف الفصوص، وتكون شائعة الحدوث في بعض الأجناس الورقية مثل هيتيروديرما Herteroderma، ونيفروما Nephroma، والبارميليا Parmelia، وفي بعض الأجناس تتجدد الفصيصات، وهذا يحدث بتمزيق أو جرح القشرة، وهي تُعدّ أعضاء تكاثر خضري فعالة في كل المجاميع.

5. أشباه الجذور Rhizines

أشباه الجذور هي عبارة عن أشرطة مضغوطة من خيوط عديمة اللون أو سوداء تنشأ من القشرة السفلية، وتثبت الثالوس بوسط النمو، وهي تساعد على عملية نقل المغذيات والمواد الأيضية العضوية، وهناك منها البسيطة Simple وهي غير المتفرعة، وتُعدّ أبسط أنواع أشباه الجذور كما في جنس سيتراريا Cetraria، وهناك المتفرعة Branched، وهي إما أن تكون رباعية التفرع Squarrose كما في جنس أنابتيكيا Anaptychia وبعض أنواع البارميليا Parmelia أو ثنائية التفرع Dichtomous كما في أنواع هيبوتريكيا Hypotrachia.

6. اللباد Tomentum

تختلف عن أشباه الجذور بأنها تكون غير مضغوطة، وهي عبارة عن حصيرة أو لباد أو شعرية لسلسلة أشباه جذور متعددة الخلايا أو خيوط غير منتظمة، ويمكن أن تظهر على السطح العلوي في أنواع عدة من أجناس بلتيجيرا Peltigera، وإريوديرما Erioderma.

7. الأهداب Cilia

الأهداب عبارة عن زوائد ثالوسية تشبه الشعر غير ملونة أو أشرطة كربونية من الخيوط الفطرية التي توجد على طول حواف الفصوص، ويبدو أنها ذات علاقة بأشباه الجذور، ويقتصر وجودها على الأجناس الورقية المتطورة تركيبًا مثل هيتورديرما Heterodermia، وبارموتريما Parmotrema، وأنابتيكيا Anaptychia، وفيزشيا Physcia.

8. الفتحات (الثقوب) Pores

هناك عدد من الأشنات الورقية الكبيرة التي تكون فتحات؛ وذلك للحاجة إلى وجود مسارات إضافية لتبادل الغازات، ومنها السيفالات Cyphellae التي تكون غائرة في القشرة، وتوجد في السطح السفلي لجنس ستيكتا Sticta، وتشير الدراسات إلى أنها المواقع النشطة لتبادل ثاني أكسيد الكربون، وهي أكثر الفتحات تقدمًا، إضافة إلى السيفلات الكاذبة Pseudo cyphellae، وهي فتحات بسيطة غير متميزة، وتوجد في السطح السفلي أو العلوي للأشنات الورقية، مثل: Parmelia وCetrelia وPseudocyphellarai، وفي بعض الأشنات الشجيرية مثل: Ramalina وAlectoria

وBryoria. يتراوح قطرها من 0.2-2 مليمتر، وتتغلغل في طبقة القشرة، ويعتقد أنها تؤدي دورًا مهمًا في تبادل الغازات.

9. السيفالودات Cephalodia

السيفالودات هي عبارة عن نمو خارجي من الثالوس الأشني تحتوي على طحلب أجنبي يختلف عن الطحلب المكون للأشنة، وفي جنس بلتيجرا Peltigera يبدأ تكوينها عندما تسقط مستعمرة بكتيريا النوستك Nostoc على سطح الثالوس، وتقع في شراك الخيوط الفطرية الهوائية، ويبلغ قطر الثالوس المميز الصغير المتكون نحو مليمتر أو أكبر، وإنها تحتوي على بكتيريا النوستك الزرقاء، التي تستطيع تثبيت النيتروجين وتزويد الثالوس العائل بهذا العنصر المهم، ولا يبدو أن لها تأثيرًا ضارًا على العائل، وهناك منها السفالودات الخارجية: وهي التي تتكون على السطح الخارجي للثالوس في كثير من الأشنات مثل بلتيجرا Peltigera، وبيلوفورس Pilophorus، وبلاكوبسيز Placopsis وأنواع عدة من الأجناس القشرية الصغيرة، وكذلك منها السيفالودات الداخلية التي تكون شائعة في جنس لوباريا Lobaria، ونيفروما Nephroma حيث تصطاد بكتيريا النوستك بواسطة الخيوط الفطرية على طبقة القشرة السفلية الرقيقة، ومن ثم يحمل إلى مكانه النهائي، وهو النخاع (Cole & Sheath 1990, Andersson et. al. 2011).

الشكل الظاهري للتراكيب التكاثرية

الغالبية العظمى من الأشنات من الفطريات الكيسية Ascomycetes ذات تراكيب وأجسام ثمرية Ascocarps (Ascomata) وهى الكأسية Apothecia والقارورية (الدورقية) Perithecia أو الثمار الكاذبة Pseudothecia وهى أساسًا تشبه تلك الموجودة في الفطريات اللاأشنية، بينما الفطريات البازيدية Basidiomycetes تكون مجموعة صغيرة جدًّا ذات علاقة بالفطريات البازيدية الأخرى في تركيب الثمرة البازيدية Basidiocarp.

الفطريات الكيسية Ascomycetes

هناك أكثر من 19000 نوع من الفطريات الكيسية الأشنية، التي تتميز بالأجسام الثمرية الكيسية Ascocarps التي تحتوي على طبقة ثمرية (الطبقة الخصيبة) Hymenium Layer التي تحتوي على الأبواغ في أكياس تكون متبادلة بانتظام مع الخيوط العقيمة Paraphyses، وهناك نوعان من الطبقة الخصيبة، وهما: طبقة الفطريات الكيسية الخصيبة Ascohymenial Fungi، وهذه تحتوي أكياسًا تكون متبادلة بانتظام مع الخيوط العقيمة، وكذلك طبقة الفطريات الكيسية الحجيرية (المجوفة) Asco locular Fungi، وهذه تحتوي على أكياس تنتج في حجيرات (فجوات) مع خيوط عقيمة كاذبة متفرعة Pseudoparaphyses التي هي طبقة ثمرية تشبه الحشوة تسمى الثمرة الكاذبةPseudothecia كما في قرافيس Graphis، وأوبيقرافا Opegrapha.

ويتكون جدار الكيس (الزق) Ascus في الكيسيات الخصيبية Ascohymenial Fungi من جدار مفرد وحيد النواة، بينما الكيسيات الحجيرية Ascolocular fungi تحتوي على جدار كيس من طبقتين (مزدوج الطبقة) ثنائية الأنوية، وفي الكيسيات الخصيبة يكون الجهاز القمي The apical Apparatus بشكل وسادة أو قبة أو حلقة تحت قمية، حيث تطلق الأبواغ عندما ينشأ الضغط الداخلي، بينما في الكيسيات الحجيرية يكون الجهاز القمي بشكل بروز خارجي يشبه الأصبع، والخيوط العقيمة Paraphyses والعقيمة الكاذبة Pseudoparaphyses التي تكون الطبقة الخصيبة تنشأ من أصول عدة مختلفة، وأبسطها يوجد في الأشنات الورقية التي تحتوي على بكتيريا زرقاء، حيث تنشأ الخيوط العقيمة الحقيقية من نسيج مولد مباشرة، وتكون حرة الأطراف، وغالبًا غير متفرعة، في كل الفطريات الزقية الخصيبة، بينما في الكيسيات الحجيرية تنشأ الخيوط العقيمة الكاذبة من خيوط متفرعة من الطبقة فوق العقيمة Supra hymenial Complex وتكون عادة مصاحبة للأكياس ثنائية الأنوية في الأشنات.

الأجسام الثمرية الكيسية Fruiting Bodies (Ascomata)

الأجسام الثمرية للفطريات الأشنية تكون مماثلة إلى حد ما لتلك الموجودة في الفطريات اللاأشنية، إلا أنها لا تكون دائمًا متطابقة تمامًا، إلا أنه من المؤكد أنها أكثر مقاومة، وتعيش مدة أطول وأحيانًا تحور بواسطة أجسام من الأنسجة الثالوسية في السابق كانت تقسم إلى نوعين رئيسين، وهما:

أ) الأجسام الثمرية القرصية (الكأسية) Apothecia (Discothecia).

ب) الأجسام الثمرية القارورية (الدورقية) Perithecia.

وقد أضيف إليهما لاحقًا نوعان آخران هما:

1. الأجسام الخصيبة Ascohymenial
2. الأجسام الحجيرية Ascolocular

وغالبًا يطلق على الأجسام القرصية والدورقية للأشنات الخصيبة، والأجسام الثمرية الكاذبة Pseudothecia والحشوة الكيسية Ascostromata أو شبه القارورية Perithecioid Ascomata وشبه الكأسية Apothecioid Ascomata على الأشنات الحجيرية.

أ) الثمرة الكيسية القرصية Apothecium

هي غالبًا تركيب قرصي أو كأسي الشكل الذي يتألف من خيوط عقيمة حرة النهايات وأكياس Asci، التي تكون طبقة رقيقة تبطن السطح الداخلي للقرص التي تعرف بالطبقة الخصيبة، وتغير الأشكال ليس بضخامة الفطريات اللاأشنية، ويتراوح قطر الثمرة من 0.5-20 مليمترًا، وذلك

بحسب حجم الأشنات، وبعضها تكون معنقة، وفي بعض أنواع قليلة من الأشنات يتحلل القرص عند النضج، ويطلق الأبواغ، وتكون كتلة الخيوط العقيمة ثمرة قرصية مفككة تسمى المازيديم Mazaedium (شكل 3-9).

ب) الثمرة الكيسية القارورية Perithecia

هي غالبًا تركيب قاروري (دورقي) الشكل مغمورة في الثالوس، يتراوح قطرها من 0.5-2 مليمتر، وتتكون فتحة من الطبقة الخصيبة في السطح العلوي للثالوس لإطلاق الأبواغ، وتنشأ جدرها من الثالين Thalline، الذي قد يكون مكربنًا، وقد يتكون من طبقات عدة، والثالين Thalline هو وجود كلٍّ من الخيوط الفطرية والطحالب معًا، ومعظم الأجناس تحتوي على ثمار زقية حجيرية.

ج) الثمرة الكيسية الكاذبة Pseudothecia

معظم الأشنات ذات الثمار الكيسية الحجيرية Ascolocular تحتوي على ثمار عدة كيسية مختلفة تشبه سطحيًّا الثمار القرصية أو الدورقية، ولكنها تكون مختلفة عنها من حيث المنشأ والتركيب.

الأبواغ Spores

تكون أعدادها 2، 8، 16، 64 بوغًا في كل كيس، والأكثر شيوعًا هو 8 أبواغ في الكيس الواحد، وأحجامها تتراوح من 1-500 ميكرون، وهي إما عديمة اللون أو بنية، وتقسم بحسب وجود الجدر العرضية إلى أربعة أنواع هي:

1. الأبواغ البسيطة أو وحيدة الخلية (Simple (Unicellular، وتكون وحيدة الخلية وغير مقسمة بجدر عرضية، وغالبًا صغيرة (10-30 ميكرونًا) وذات جدار رقيق.

2. الأبواغ المقسمة بجد عرضية Trans versely Septate Spores، تكون مستطيلة وعديدة الخلايا وذات جدر عرضية من واحد إلى 30-40 جدارًا عرضيًّا.

3. الأبواغ المقسمة في كل اتجاه Muriform Spores، تكون عديدة الخلايا ذات جدر عرضية وطولية وغالبًا كبيرة نوعًا ما.

4. الأبواغ القطبية الحجيرية Polari locular Spores، هي أبواغ ثنائية الخلايا ذات جدار وسطي سميك وغطاء رقيق.

البكنيدات Pycnidia

يبدأ تكونها بوصفها كتلة خيطية صغيرة في الطبقة الطحلبية، وغالبًا تكون مستقلة عن الثمار الكيسية، ثم تتميز إلى شكل حجرة دورقية ذات جدار تُفتَح على السطح بفوهة، وهي تشبه إلى حد

كبير الثمرة القارورية، ومعظمها تكون مغمورة في الثالوس، ويبطن جدار الحجرة بحوامل بكنيدية Pycnidio phores التي منها تتبرعم الكونيدات الدقيقة Microconidia، وتُسمى أيضًا البذيرات Spermatia التي هي عناصر مذكرة غير متحركة، وهذه تتحد مع الأنوية في الحافظة الكيسية، وفي أعداد قليلة مثل الأشنات الجيلاتينية تتكون في طبقة النخاع، ويوجد كونيدات كبيرة Macroconidia مقسمة بجدر عرضية تعرف بالأبواغ الستيلية Stylospores التي تتكون بطريقة تكون الكونيدات الدقيقة نفسها.

الفطريات البازيدية Basidiomycetes

هناك نحو عشرين نوعًا فقط من الفطريات البازيدية الأشنية مقارنة بآلاف الأنواع من الفطريات الكيسية الأشنية، وتقسم الفطريات البازيدية إلى ثلاثة مجاميع، وهي:

1. مجموعة شبه قشرية Corticioid

كما في جنس كورا Dictyonema (cora) وهو جنس واسع الانتشار في المناطق الاستوائية تنمو على الصخور أو التربة أو جذوع الأشجار، وغالبًا في المرتفعات العالية والثمرة البازيدية Basidiocarp تكون على شكل قوس وجلدية الملمس، وتحتوي على طبقة طحلبية داخلية مميزة والمتكافل الطحلبي هو كلوروكوكس Chlorococcus أو سيتونيما Scytonema، وتتكون الحوامل البازيدية والبازيدات على السطح السفلي.

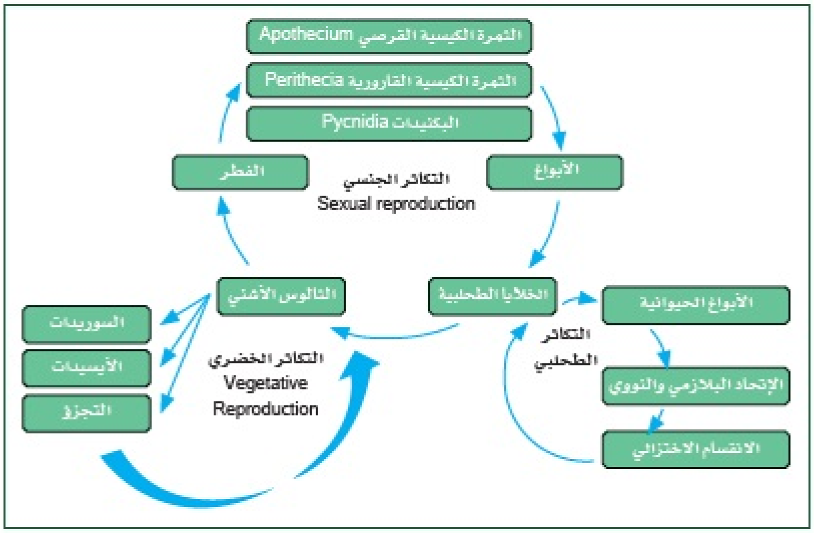
2. مجموعة شبه متشققة Clavarioid

3. مجموعة شبه أجارية Agaricoid

مجموعتا شبه المتشققة الكلافاريود Clavarioid وشبه الأجارية الأقاريكويد Agaricoid تحتوي على فطريات لا تتحور غالبًا بالنمط الطحلبي، وهي تنمو على التربة والدبال والأخشاب المتعفنة غالبًا في المناطق المعتدلة إلى الشمالية، والأجناس النموذجية مثل بوتريدينا Botrydina، وملتيكلافيولا Multiclavula، وأومفالينا Omphalina تكون أجسامًا ثمرية فطرية ضعيفة مع عناقيد من الخلايا الطحلبية (كوكوميكسا Coccomyxa) مغلفة بخيوط فطرية في القاعدة.

التكاثر والانتشار Reproduction & Dispersal

تبدأ دورة حياة الأشنات الجنسية بتكون أجسام ثمرية بواسطة المكون الفطري تنتج أبواغًا، ثم تنتشر الأبواغ وتحت الظروف الملائمة تنبت على افتراض أنها تكتسب طحلبًا متوافقًا، وتكون ثالوسًا خضريًّا جديدًا، والانتشار الخضري يتم بواسطة أعضاء تكاثر خضري فريدة مميزة بالأشنات، على الرغم من أن طرق التكاثر الفعلية ما زالت معقدة، ولم تفهم جيدًا بعد (الشكل 9-6).


Apothecium الثمرة الكيسية القرصي
Perithecia الثمرة الكيسية القارورية
Pycnidia البكنيدات
الفطر
التكاثر الجنسي
Sexual reproduction
الأبواغ
الثالوس الأشني
الخلايا الطحلبية
الأبواغ الحيوانية
السوريدات
الأيسيدات
التجزؤ
التكاثر الخضري
Vegetative
Reproduction
التكاثر
الطحلبي
الإتحاد البلازمي والنووي
الانقسام الاختزالي

الشكل (9-6): أنواع التكاثر في الأشنات.

التكاثر الخضري Vegetative Reproduction

تعتمد الأشنات اعتمادًا كبيرًا على التكاثر الخضري في سرعة الانتشار وغزو بيئات جديدة في الأوساط المحيطة، وتراكيب التكاثر الخضري التي تسمى الأبواغ المزدوجة الخضرية Vegetative diaspores هي تراكيب أشنية تعمل فيها المكونات الفطرية والطحلبية معًا بوصفها وحدات مستقلة منفصلة من الثالوس تشبه في وظائفها البريعمات gemmae في جنس الماركنتيا Marchantia، وعندما تتحرر من الثالوس تكون قادرة على التكاثر الخضري ومواصلة النمو، وهذه التراكيب الخضرية diaspores في الأشنات تشمل السوريدات، والإيسيدات، والحويصلات الهورمية، إضافة إلى التراكيب الثالينية Thalline structures التي منها الثالوس الصغير (حرشفية) Squamules، والفصيصات Lobules والقطع Fragments، حتى الثالوس كامل. ومن الجدير بالذكر أن هناك ما يعرف بالكونيدات Conidia، وهي تؤدي دورًا مهمًّا في التكاثر الخضري، والكونيدات هي أبواغ أحادية المجموعة الصبغية (n1) تنتج من دون حدوث اتحاد نووي ولا انقسام اختزالي سابق، وهي من المميزات الخاصة للفطريات الناقصة.

وهي غير معروفة في الأشنات فيما عدا ذات الحوامل الخيطية hyphophores في عائلة أستيروثيرييسي Astero thyriaceae وفي أعداد قليلة في المزارع التكافلية المعزولة مثل بوليا Buellia، وستيلينقينا Stillingiana إلا أن بعض الأشنات تكون كونيدات دقيقة Microconidia في البكنيدات Pycnidia في الثالوس التكافلي. والكونيدات الدقيقة لعدد من الأشنات القشرية تنمو في البيئة الصناعية، وتكون مستعمرات تكافلية تشبه تلك الموجودة في بعض الفطريات الكيسية اللاأشنية، وهذه التراكيب تنتقل بطرق عدة مختلفة، حيث تحمل بواسطة عدد من الوسائل مثل:

1. المواد البرازية لليرقات والقواقع التي تحتوي على أبواغ وقطع من الأشنات التي تنتشر لأمتار عدة.

2. وتحمل بواسطة الماء والحشرات.

3. وتنتقل لمسافات طويلة بواسطة بعض أنواع الطيور التي يهاجر بعضها لمسافات طويلة.

السوريدات وقطع الثالوس الصغيرة تنتقل بواسطة الرياح؛ ولذا تكون الأنواع ذات السوريدات أكثر انتشارًا من الأنواع الأخرى.

التكاثر الجنسي Sexual Reproduction

التكاثر الجنسي في الأحياء الدقيقة عادة ما يكون مرتبطًا بتكوين الأبواغ؛ ولذا لا يمكن القول: إن الثالوس الأشني المركب يتكاثر جنسيًّا؛ وذلك لأن إنتاج الأبواغ ميزة للفطر وحده، مع أنه قد يكون فعالًا في الحالة التكافلية مع الطحلب. الطرق الجنسية Sexual processes في تراكيب التكاثر الجنسي الأشنية هي:

1. جهاز الحافظة الكيسية Ascogonial Apparatus الذي يتكون من ملف كيسي يعمل بوصفه عنصرًا مؤنثًا (-).

2. الكونيدات الدقيقة Microconidia التي تعمل بوصفها عناصر مذكرة (+)، وقد تنشأ النواة المؤنثة والكونيدات الدقيقة على غزلين فطريين مختلفين، ويحدث الاتحاد البلازمي عندما تتزاوج أو تندمج الكونيدة المتوافقة مع النواة المؤنثة.

وهذا النمط من التكاثر المتباين Hetero mictic Type وهو اتحاد العنصر المؤنث والمذكر من غزلين مختلفين لا يعني أنه شائع الحدوث في الفطريات غير الأشنية، بينما الاتحاد البلازمي المتماثل Homo mictic Plasmogamy وهو اندماج الأنوية المتشابهة وراثيًّا من نفس الثالوس، يبدو أنه ظاهرة أكثر انتشارًا،

وقد يكون عنصر الإخصاب؛ أي الخيط الفطري الذي يتصل بالحافظة الكيسية Ascogonium، وفي بعض الحالات التي تكون مختزلة جدًّا يكون إخصابًا ذاتيًّا Autogamy أو عذريًّا Parthenogensis (إثمار من دون إخصاب) للأنوية في داخل الحافظة الزقية نفسها.

الخطوات التي تؤدي إلى تكون الثمار الكيسية والأبواغ لم تفهم بعد جيدًا في المختبر مقارنة بالفطريات الأخرى، إلا أن أحد العلماء استطاع زراعة المتكافل الفطري كلادونيا Cladonia حتى تكونت كلٌّ من البكنيدات pycnidiua، والتراكيب شبه القدمية Podetia (الشكل 8ش)، كما شاهد الحوافظ الكيسية والشعيرات في قمم تلك التراكيب، ولكن لم يشاهد الأبواغ الزقية، كما استطاع

مشاهدة التكون من البوغ الكاملة لجنسي إندوكاربن Endocarpon، وستوروثيلي Staurothele، ما عدا ذلك لم يعرف أن الفطريات تكون ثمارًا في ظروف المختبر.

تطلق الأبواغ من الأكياس عندما تترطب الثمرة القرصية Apothecium وتقذف بقوة إلى ارتفاع يصل إلى 43 ميليمترًا فوق القرص، وبعدما تقذف الأبواغ من الثمرة الكيسية تسقط مرة ثانية على سطح الثالوس أو على الوسط المغذي، فإذا كانت الرطوبة كافية فإن الأبواغ سوف تنبت، لكن من الصعب تحديد الوقت الفعلي المطلوب للإنبات ومدة الكمون، وتتغير الأبواغ بشكل كبير عندما تنمو على الآجار، وإن المغذيات غير الطبيعية قد تثبط الإنبات.

فالأنواع القشرية قد تنبت في مدة قصيرة من ساعة إلى ساعتين، والأنواع الورقية قد تأخذ أيامًا عدة، بينما بعض أنواع بلتيجرا Peltigera وأشنات أخرى قليلة لا يبدو أن لها أبواغًا حية على الأقل تحت ظروف الزراعية الصناعية، وفي بعض الحالات النادرة قد تكون الأبواغ النابتة غزلًا فطريًّا يشبه الغزل الفطري في الفطريات اللاأشنية، ويدخل في حالة ترمم حقيقي، وهذه قد تكون فقدت الاعتماد على الطحالب على الأقل مؤقتًا كما في بوليا Buellia.

التهجين Hybridization

الاختلاف في التراكيب الظاهرية قد يكون نتيجة للتهجين (التزاوج) للجماعات المتكاثرة جنسيًّا، وهناك أنواع معينة مثل كلادونيا Cladonia ويوسينا Usnea تظهر عينات وسطية غير مصنفة يبدو أنها هجين لنوعين معروفين أو أكثر، وقد وجد أحد العلماء في أثناء استخدامه مزارع البوغ الواحد لجنس كلادونيا Cladonia أن هناك اختلافات واسعة في كل من شكل نمو الغزل الفطري والنواتج الأيضية، وخاصة الحبيبات الصبغية، وتختلف المزارع بشكل كبير في:

1- الحجم. 2- الشكل. 3- اللون. 4- إنتاج الخيوط الهوائية.

بينما استخدام مزارع الأبواغ الكثيرة لم تظهر هذه الاختلافات، وهذا ناتج عن عملية التلقيح الجنسي والتلقيح واتحاد الأنوية ومعاودة اتحاد الجينات Recombination Gene.

التأشن Lichenization

التأشن هو إعادة تكون الثالوس الأشني بارتباط الأبواغ الكيسية النابتة مع طحلب ملائم، وهذه تتطلب خطوتين أساسيتين:

- أولًا: التقابل Encounter: الفطر يجب أن يقابل طحلبًا ملائمًا لكي يجدد العلاقة التكافلية، وفي بعض أنواع الأشنات ليس في ذلك مشكلة؛ لأن الطحالب تكون موجودة في الطبقة الخصيبة، وتكون الطحالب من جنس ستيكوكوكص Stichococcus، وبيرتوساريا Pertusaria لاصقة في الأبواغ عندما تطلق.

- ثانيًا: الاتصال (الملامسة) Contact بالطحالب التي إما أن تكون موجودة مسبقًا في نفس المنطقة القريبة من الغزل الفطري أو التي حملت بواسطة الرياح أو الماء أو الحيوانات.

ولا يبدو أن الخيوط الفطرية تنمو بنشاط في اتجاه الطحالب، وهذا التفاعل هو استجابة لملامسة المحفز الغذائي Thigmotrophic، وإذا اتصل أنواع عدة من الطحالب، فإن الفطر قد يدمجهم (يدخلهم) من دون تفرقة في الثالوس الأولى Prothallus، ونظرًا لأن نوعًا طحلبيًّا واحدًا فقط، عادة تربيوكسيا Trebouxia أو Pseudotreouxia يكون هو المتكافل الطحلبي لمعظم الأشنات الراقية؛ لذا يجب أن تكون عملية التأشن عالية الاختيارية.

تكون الثالوس Thallus Formation

خطوات تكون الثالوس الأشني لم تُدرس بشكل مفصل، ولكن أحد العلماء وجد في نوع الأشنة القشرية ليكانورا Lecanora varia أن حصيرة طحلب أخضر تغطي فروع أشجار الصنوبر الصغيرة بعد النضج مباشرة، وأن خيوطًا فطرية غير متفرعة رقيقة يفترض أنها نشأت من أبواغ أشنية، تلتف على الحصيرة الطحلبية، وتكون كتلًا غير منتظمة مع الطحلب التي تصبح ثالوسًا قشريًّا squamule معروفًا في نهاية السنة الثانية، وتنتج الشعيرات Trichogynes بغزارة في السنة الثالثة، ثم تنتج الثمار القرصية Apothecia في السنة السابعة أو الثامنة.

الأشنة الورقية الهيبوجيمنيا Hypogymnia تتكاثر بواسطة السوريدات Soredia المحمولة بواسطة الرياح كما شوهدت بالتوزيع العشوائي للثالوس المتكون على الأوراق الإبرية والفروع القصيرة لأشجار الصنوبر، ويمكن مشاهدة السوريدات بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح ضمن مستعمرات طحلبية والقشور المتأشنة حديثًا لجنس ليكانورا Lecanora، وتتشعب الخيوط الفطرية بشكل أشعة من السوريدات المفردة، وقد تصبح حرة من الطحالب، ثم تتحد مجددًا مع الطحالب الموجودة على لحاء الخشب، وذلك في نهاية السنة الثانية، وهذا الثالوس يتفرع بسرعة، وينمو إلى ثالوس ناضج عادي.

ولقد جمع أحد العلماء مزارع المكون الفطري لجنس كلادونيا Cladonia مع مكونه الطحلبي لجنس تريبوكسيا Trebouxia وتمكن من مشاهدة الخطوات التي أدت إلى تكوّن الثالوس الأشني الصغير Squamule الذي من دون قشرة سفلية، وفي البداية تتصل الخيوط الفطرية بخلية طحلبية، وتغلفها، وبعدما تحاط مجاميع عدة من الطحالب يتكون ثالوس أولي (بدائي) Prothallus وهذا يتميز فيما بعد إلى قشرة، وطبقة طحلبية، ونخاع على مدى أسابيع عدة، حتى يتكون الثالوس الأشني الصغير Squamule الذي لا يمكن تمييزه عن تلك التي تحدث طبيعيًّا.

وقد تنمو أبواغ كيسية عدة Ascospores من أشنات مختلفة معًا، ومن ثم تصبح مندمجة في الثالوس النامي، وليس من الغريب أن تحتضن صخرة صغيرة أو سطح لحاء خشب من خمس إلى

عشر أشنات مختلفة، وإذا وقعت كل الأبواغ المقذوفة (المطلقة) في شراك (شبك) حصيرة الثالوس الأولي، فإنه من المنطق أن تكون متساوية الفرصة في الاشتراك (المساهمة) في التأشن، وهوية هذه الحصيرة البوغية المتباينة (الفطرية) Heterosporic Mat قد تكون أكثر تعقيدًا، وذلك بإدماج السوريدات المحتوية على جنس تريبوكسيا Trebouxia وأجزاء من ثالوس أجنبي آخر، وهذا الثالوس الهجين الناتج هو عقدة قورديان (أشنية) Gordian Knot للخيوط المتحدة والتشابكات الخضرية، وقد يكون لمكون فطري واحد في الثالوس البوغي المتعدد Polysporic Thallus آلية عالية الفعالية لكبح (تثبيط) مكونات أخرى.

وظائف الأعضاء والتغذية Physiology and Nutrition

يتطلب أيض الأشنات دراسة الثالوس الأشني المركب السليم Composite Thallus، ودراسة كل من الطحالب والفطريات المعزولة في مزارع نقية؛ وذلك لسهولة التحكم في التجارب، وتواجه الدراسات الفسيولوجية طويلة الأمد للثالوس الأشني المركب السليم بصعوبات عدة، مثل صعوبة المحافظة على حالة التكافل، وصعوبة منع التفكك البطيء لمكونات الثالوس، وكذلك صعوبة التحكم في التلوث.

المـاء Water

يأتي في مقدمة موضوع وظائف الأعضاء والتغذية دراسة العلاقات المائية

Water Relations، فالأشنات لا تمتلك أعضاء خاصة لامتصاص الماء ونقله، ويبدو أن الامتصاص في الثالوس الأشني هو عملية فيزيائية، والعلاقات المائية بشكل عام تكون مشابهة لتلك المواد الخاملة (الجامدة) مثل الآجار، والجلي، والسليلوز، ويمتص الماء بواسطة التشرب، ومعظم الماء الموجود في الثالوس المشبع يمسك خارج السيتوبلازم جزئيًّا بواسطة جدر الخلايا المنتفخة وجزئيًّا بواسطة الفراغات البين خلوية، وتحتوي الأجزاء المختلفة من الثالوس المشبع على محتويات مائية مختلفة، وإن الأنسجة المختلفة تتباين في السعة المائية القصوى، فمثلًا:

النخاع في جنس بيلتجيرا Peltigyera يحتوي على 25% زيادة ماء لوحدة الوزن الجاف أكثر من الطبقة الطحلبية والقشرة العليا، وفي الثالوس غير المشبع قد تمسك الطبقة الطحلبية بمعظم الماء.

ويكون المحتوى المائي Water Content في معظم الأشنات الورقية والشجيرية يتراوح فيما بين 100% إلى 300% للوزن الجاف، والأشنات الجيلاتينية المتماثلة الثالوس تحتوي على قيم أعلى من ذلك، والسبب في ذلك لأن الغلاف الجيلاتيني السميك للمكون الطحلبي الأخضر المزرق لديه القدرة على الإمساك بكميات كبيرة من الماء، كما في بعض أنواع جنس كوليماCollema حيث يتراوح من 800-3900% وليبتوقيم Leptogium يصل فيه المحتوى المائي إلى 830% كنسبة من الوزن الجاف.

معدل الامتصاص Absorption Rate

معدل امتصاص الماء السائل بواسطة الثالوس الجاف يكون سريعًا، حيث إن الثالوس الجاف هوائيًّا يصبح مشبعًا تمامًا بعد غمره في الماء في درجة حرارة الغرفة من مدة دقيقة أو دقيقتين، ولا يزيد على 30 دقيقة، فبعض الأشنات القشرية تكون محاطة بمواد أشنية غير قابلة للبلل، وفي بعض الحالات لا تصل إلى درجة التشبع حتى بعد غمرها في الماء لمدة ست ساعات، مثل هذه الأشنات تعتمد بشكل رئيس على بخار الماء في الطبيعة بدلًا من الماء السائل.

وبالنسبة إلى رطوبة الوسط المحيط بالثالوس الأشني، فإنه عندما يوضع الثالوس الجاف هوائيًّا في جو رطب يزداد محتواه المائي ببطء خلال 1-9 أيام حتى يصل إلى قيمة توازن ثابتة.

وقد وجد أن بعض الأشنات الورقية والشجيرية يصل محتواها المائي إلى 30

أو 50% من درجة التشبع في 95% رطوبة نسبية، ويصل إلى 50 أو75% عند وضعها في 100% رطوبة نسبية، والمحتوى المائي للأشنات في الطبيعة يقع في حدود تلك القيم

أو أقل منها بقليل، وتصل إلى درجة التشبع العظمى في أثناء سقوط الأمطار أو بعدها بمدة قصيرة.

فقد الماء Water Loss

الأشنات ليس لديها قدرات خاصة للإمساك (الاحتفاظ) بالماء أكثر من المواد الأخرى، وقد وُجِد أن المحتوى المائي لجنس أومبليكاريا Umbilicaria هبط إلى 15% في ست ساعات في 60% رطوبة عند 20، وتحت ظروف الجفاف الشديدة يكون المحتوى المائي للأشنات منخفضًا جدًّا، وتوضح الدراسات الحقلية أن المحتوى المائي الأدنى يتراوح من 2- 14%، ووُجد أيضًا أن هناك علاقة بين درجة تطور شبكات الثالوس الأشني والاحتفاظ بالماء، حيث وُجد أن الأنواع الورقية المفصصة والأشنات المتكتلة مثل كلادينا cladonia يكون لديها مقاومة أعلى لفقد الماء من الأنواع المفتوحة (المفككة) دقيقة التفرع مثل أليكتوريا Alectoria؛ ولذا قد تحور الأشنات تركيبها الظاهري أو تركيب مستعمراتها لتحصل على طريقة أفضل للاحتفاظ بالماء.

مقاومة الجفاف Drought Resistance

من المعروف أن الأشنات توجد في عدد من الصحاري، حيث قد لا يسقط المطر سنوات عدة، ولا يوجد سقوط ندى، وقد وجد أحد العلماء أن جنس كلادينا Cladonia المبللة تبقى حية لمدة ثمانية أسابيع فقط، وذلك بتقدير التمثيل الضوئي على المبللة، ولكن جنس أومبيكليكاريا Umbilicaria يبقى لمدة 62 أسبوعًا، وذلك في المختبر، والنوع الشجيري الصحراوي رامالينا Ramalina يمكن أن يتحمل الجفاف لمدة سنة على الأقل دون أن يحدث له تلف، ووُجد أن نشاط التمثيل الضوئي

يتوقف بعد 64 شهرًا في الأشنة الصحراوية كوندروبيز Chondropsis بعد حفظها في المختبر، وذلك بقياس كمية الأوكسجين الممتص.

البناء الضوئي Photosynthesis

يقتصر البناء الضوئي في الأشنات على المتكافل الطحلبي الذي يحتوي على الكلوروفيل، ولا يتوقع أن يختلف عن ذلك الموجود في الطحالب حرة المعيشة، ومن الواضح أن البناء الضوئي مهم جدًّا للعلاقة التكافلية، حيث إن المتكافل الفطري متباين التغذية Heterotrophic؛ أي يموت إذا لم يتوافر له إمداد من المواد الممثلة ضوئيًّا بواسطة الطحلب، ويبدو أن الطحالب الأشنية تسلك مسار البناء الضوئي ثلاثي الكربونC3-Photosynthetic pathway.

معدل البناء الضوئي والضوء Rate of photosynthesis & light

الأشنات ذات معدلات بناء ضوئي أقل بكثير من أوراق النباتات الراقية لوحدة مساحة السطح مع أن معدلات التنفس غالبًا تكون متقاربة في كلا نوعي الأنسجة؛ لذا فإن محصلة التمثيل الضوئي سوف تكون أقل بكثير في الأشنات منها في الأوراق، ومحتوى الكلوروفيل في الأشنات يتراوح من 10% إلى 25% فقط من الكلوروفيل في الأوراق الخضراء، ووُجد أن الخلايا الطحلبية تكون 3- 5% فقط من حجم الثالوس لجنس بيلتيجرا Peltigera و7% لجنس زانثوريا Xanthoria.

بينما الأشنات النامية في الظل الذي هو بيئة متطرفة قد تحتوي ضعف كمية الكلوروفيل الموجود في النباتات لنفس النوع الموجودة في ضوء الشمس، فبعض الأنواع التي تتحمل الظل مثل بلتيجرا Peltigera قد تلجأ إلى طريقة أخرى مثل زيادة تراكيز صبغة التمثيل الضوئي الإضافية الفيكوارثيرين (حمراء) Phycoerythrin التي تجعل الأشنة قادرة على الاستخدام الأمثل للأشعة الساقطة المنخفضة.

والأشنات تعيش في بيئات مختلفة كثيرًا؛ ولذا يكون لديها متطلبات مختلفة من الضوء للبناء الضوئي الأمثل، ومعظم نقاط (درجات) الامتصاص المسجلة هي بين

200 – 2000 lux (وحدة الإضاءة)، وإن كثافة تلون القشرة العليا تختلف أيضًا، ويبدو أنها تتحكم في كمية الضوء الذي يصل إلى الطحالب، ومن المعروف أن أنواع زانثوريا Xanthorai تكون برتقالية شاحبة إلى صفراء في البيئات الظليلة وبرتقالية حمراء غامقة في ضوء الشمس الكامل وذلك بتغير نفاذية (عتامة) القشرة.

ولقد وُجد أن هناك علاقة متبادلة طردية (ارتباط) بين الإشعاع وتراكيز حمض يوسنيك Usnic Acid الذي هو حبيبة صبغية قشرية صفراء في جنس كلادنيا Cladonia؛ أي إنه كلما زادت نسبة الأشعة زاد محتوى الحمض، وبعض الأشنات الأرضية مثل بلتيجيرا Peltigera يبدو أنها تجمع

(تراكم) مستويات منخفضة أو عالية من الضوء بسرعة، وهذا يجعل الأشنة تحافظ على مستويات مثلى من البناء الضوئي في أثناء ظروف اختلافات الضوء الناتجة عن تساقط الأوراق من الغطاء النباتي.

البناء الضوئي والمحتوى المائي Photosynthesis & water content

معدل البناء الضوئي يكون ذا علاقة متبادلة وثيقة بالمحتوى المائي للثالوس، ودرجة التشبع المثلى هي من 35-70% أو أكثر، ومستوى الوصول إلى المعدل الأقصى يكون إلى حد ما أقل منه في حالة التنفس، ولقد بينت الدراسات على الأشنات الصحراوية أن البناء الضوئي يمكن أن يحدث في الرطوبة العالية نسبيًّا (92-98%) في غياب الماء السائل، وإذا كان الثالوس مشبعًا بالماء فإن المعدل ينخفض؛ وذلك بسبب انخفاض الانتشار الغازي إلى الطبقة الطحلبية (.Azoulay et. al 2006, Baltz &. Hegemann 1993).

وعندما يبلل الثالوس الجاف يزداد معدل البناء الضوئي ببطء حتى يصل إلى المعدل الطبيعي، وإذا حفظ الثالوس مبللًا صناعيًّا لمدة أسبوع أو أكثر، فإن القدرة على البناء الضوئي ومجموع المحتويات المتعددة Polyols تنخفض، وفي النهاية يموت الثالوس.

مواد البناء الضوئي Photosynthesis

يمكن تتبع البناء الأيضي وتدفق مواد التمثيل الضوئي المنتجة بواسطة المكون الطحلبي بواسطة مركبات الكربون المشع C14، ويدمج (يدخل) الطحلب الكربون في معظم البروتوبلاست Protoplast على شكل مواد أيضية غير ذائبة تخزن في النشاء وحول مراكز النشاء Pyrenoids، وفي حالة التكافل تتحول المواد الأيضية إلى كربوهيدرات ذائبة Glucans & Sugar Phosphate، ثم إلى جلوكوز Glucose وذلك في الأشنات ذات البكتيريا الزرقاء Cyanobacteria، وإلى كحوليات متعددة Polyols (ريبيتول Ribitol، وسوربيتول Sorbitol، وإريثريتول Erythritol) في الأشنات ذات الطحالب الخضراء Green Algae ثم تطلق إلى الفطر، وهذا النقل يكون ضخمًا، حيث يصل إلى 80% من الكربون المثبت بواسطة الطحالب، حيث يأخذ الفطر الكربوهيدرات الذائبة، ويحولها مباشرةً إلى مانيتول Manitol الذي هو كحول سكري مخزن غير موجود في الطحالب.

والكحوليات المتعددة Polyols تنتقل من الطحلب إلى الفطر بواسطة الانتشار الكتلي، وعندما تعزل الطحالب من الثالوس الأشني، وتنمو في مزرعة مستقلة يتوقف فقد الكربوهيدرات وإنتاج الجلوكوز والريبيتول Ribitol خلال ساعات، وهذا يدل على أن الفطر يمارس بعض تأثير التغذية الحية Biotrophic effect في المكون الطحلبي.

ولم يعرف جيدًا إلى أي مدى قد يستبدل البناء الضوئي بالتغذية الرمية، ولكن من حقيقة أن كلًّا من المتكافلين يستخدم مدى واسعًا من المركبات العضوية في المزرعة المعزولة؛ لذا يمكن افتراض أن الأشنات تستطيع امتصاص واستخدام بعض المركبات العضوية الذائبة في الرواشح المارة فوق سطح الثالوس، أو تمت،ص وتنتقل إلى النخاع والطبقات الأخرى بواسطة الخيوط شبه الجذرية أو أشباه الجذور Rhizines.

التنفس Respiration

معدلات التنفس للأشنات تقع في المستوى المنخفض (الأقل) للقيم المسجلة لأوراق النبات مغطاة البذور البالغة، ويمكن القول بشكل عام: إن المعدلات لمعظم الأشنات تحت الظروف المثلى في درجة 20 تقع ما بين 0.2-2 ملجم CO2/ جرام وزن جاف/ الساعة، مع العلم أن معدلات التنفس للثالوس تختلف بشكل كبير باختلاف أعمار الثالوس أو حتى المناطق المختلفة لنفس الثالوس، فمثلًا في بلتيجيرا Peltigera يكون معدل تنفس النخاع أقل من الطبقة الطحلبية ومن القشرة الواقعة فوقه، ويُعتقد أن معظم قيم التنفس تعكس (تمثل) النشاط الرئيس للفطر، ولم يعثر على نشاط تنفس ضوئي Photorespiration في الأشنات، وهذا غير طبيعي للنباتات ذات المسار البنائي الضوئي ثلاثي الكربون C3-Photosynthetic pathway، وهناك أدلة على مقاومة انتشار غاز ثاني أكسيد الكربون CO2 من طبقة القشرة البارنشيمية السميكة لبعض الأنواع، ويُعتَقد أن التشبع المائي العالي للثالوس يثبط نقل CO2.

التنفس والمحتوى المائي Respiration & water content

يزداد معدل التنفس مع الزيادة في المحتوى المائي بشكل خطي إلى حد ما حتى يصل إلى الدرجة القصوى، والدرجة القصوى للتنفس قد تكون في محتوى مائي منخفض يصل إلى 40% تشبع، ولكن الغالبية العظمى تصل إلى المعدلات القصوى في مدى من 80-90% تشبع، وعندما تصل إلى المعدل الأقصى لا تغير الزيادة في الماء من معدل التنفس، والظاهرة الأكثر إثارة للمحتوى المائي هي ظاهرة إعادة التشبع Resaturation أو ظاهرة التضخم الرطب، وهي أنه عندما تترطب الأشنة الجافة هوائيًّا يكون هناك فقد أولي سريع لـغاز ثاني أكسيد الكربون CO2 وارتفاع حاد في معدل التنفس الذي يكون مصحوبًا بتدفق سريع للذائبات العضوية وغير العضوية من المكون الفطري وينخفض هذا المعدل بالتدريج خلال ساعات عدة إلى المعدل الطبيعي، ولكن البناء الضوئي في الوقت نفسه يزداد ببطء إلى المستوى الطبيعي (Al-Falih & Al-Julaifi 2002). وتكون نتيجة هذا التفاعل للترطيب هي فقد الكربون الكبير، وقد اقترح أن هناك مدة يأخذ فيها الطحلب الذائبات المسربة من المتكافل الفطري، وفي الوقت نفسه تعمل البركة الكبيرة للكحوليات المتعددة Polyols غير العادية المحفوظة بواسطة الفطر بوصفها سائلًا عازلًا Puffer أو حارسًا ضد التلف الناتج عن أوقات الترطيب المتكررة.

المتطلبات المعدنية Mineral Requirements

تلبي الأشنات احتياجاتها المعدنية إما بواسطة تلك الموجودة في الهواء، وهذه تدخل إلى الثالوس بشكل عناصر مرتبطة بالدقائق العالقة في الجو التي تسقط كدقائق جافة أو ذائبة في مياه الأمطار، أو بواسطة تلك التي تدخل إلى الثالوس من الوسط المغذي، والأشنات لديها قدرة غير عادية على امتصاص الأيونات من الأوساط المغذية بكميات أكثر من احتياجاتها بكثير.

والنيتروجين مادة أيضية أساسية لبناء البروتين في كل من الفطر والطحلب، ويبدو أن القلوتامينGlutamine هو أحد المركبات النيتروجينية المخزنة الرئيسة في الأشنات، وقد وُجد أن المحتوي النيتروجيني لجنس بلتيجيرا Peltigera يتراوح من 3.6 إلى 4.5%، وأن النيتروجين الذائب بما فيه الأمونيا يكون نحو 25% من مجموع المحتوي النيتروجيني، وهناك مصادر عدة للنيتروجين في الطبيعة، ومنها النيتروجين المثبت طبيعيًّا في الجو الذي تصل كميته من 1 إلي 5 كجم/ هكتار/ السنة، وهناك النترات Nitrate NO3، وكذلك النيتروجين العضوي الموجود في الغلاف الخارجي للأشجار الذي يترشح في أثناء هطل الأمطار، وتصل المواد الغذائية إلى الثالوس الأشني إضافة إلى النيتروجين الذي توفره البكتيريا الزرقاء سواءً المتكافلة في الثالوس أو الموجودة في السيفالودات Cephalodia الخارجية أو الداخلية، وهذا يُعدّ مصدرًا نيتروجينيًّا آخر مهمًّا لعدد من الأشنات، كالأشنات التي تحتوي على طحلب النوستك Nostoc، أو السيتونيما Scytonema،أو الكالوثركس Calothrix التي تستطيع تثبيت غاز النيتروجين N2 في الحويصلات المغايرة Heterocysts، التي هي خلايا كبيرة في الخيوط الطحلبية التي تكون نحو 3.5% لطحلب النوستك Nostoc وذلك في الطبقة الطحلبية، ونحو 22% لطحلب البلتيجيرا Peltigera في السيفالودات، ويُطلق جزء كبير من النيتروجين المثبت إلى الفطر على شكل ببتيدات Peptides وجزء قليل منه يتجمع في المتكافل الطحلبي الأخضر المرافق.

ولقد وُجد أن الأشنات تجمع (تكدس) كمية من الزنك (Zn) والكادميوم (Cd) والرصاص (Pb) والنحاس (Cu) أكبر من السراخس والنباتات الراقية، ووُجد أن الأشنات القشرية تجمع السيلكون (Si)، والفسفور (P)، والمغنيسيوم (Mg)، والحديد (Fe)، والأمونيوم (Al) بدرجة كبيرة، بينما لا يتراكم الكبريت (S)، والمنجنيز (Mn)، والبوتاسيوم (K)، والصوديوم (Na) بشكل كبير.

ومن الجدير بالذكر أن للأشنات قدرة خارقة على تجميع وتحمل تراكيز عالية من المعادن الثقيلة من دون حدوث ضرر ظاهري، مع أن تلك التراكيز تكون مميتة للنباتات الأخرى الراقية، وهناك مجموعة كبيرة من الأشنات تعتمد بشكل كبير على كربونات الكالسيوم (الجير) Lime Stone ومغذيات قاعدية أخرى، وتحتاج إلى المغنيسيوم (Mg، وبعض الأنواع التي تعيش على الصخور المحتوية على كمية عالية من الحديد تحتاج إلى الحديد (Fe).

تحمل الحرارة والتأقلم Temperature Tolerance & Acclimation

بالنسبة إلى تحمل الأشنات للحرارة العالية، نجد أن الثالوسات الأشنية النامية في بيئات معرضة للشمس، تصل إلى درجات حرارة عالية، وقد وُجد أن درجة حرارة الثالوس تصل من 50 إلى 69؛ أي إنها تكون أعلى بـحدود 20-40 من درجات الحرارة المحيطة، ووُجد أن حدود درجة المقاومة العليا للثالوس الجاف هوائيًّا، تتراوح من 70 في أليكتوريا Alectoria إلى 101 في الكلادونيا Cladonia، ومن 35 إلى 46 بالنسبة إلى الثالوس الرطب.

وفي المقابل نجد أن الأشنات تتحمل درجات الحرارة المنخفضة بشكل واضح، حيث إن هناك أجناسًا عدة عادت إلى الحياة والتنفس بعد تعريضها لدرجات حرارة منخفضة وصلت من –183 إلى -268 لساعات عدة.

وفي الظروف الأكثر تطرفًا، كما في الوديان الجافة في القطب الجنوبي، وُجد أن بعض الأشنات الداخل صخرية الخفية Crypto endo lithic Lichens تبقى حية بشكل جيد مع أن درجة الحرارة تكون فوق الصفر لمدة تقل عن 300 ساعة في السنة بأكملها، وباقي الوقت في درجات حرارة منخفضة قد تصل إلى -70، وإن هناك صفة أخرى للأشنات تُعدّ غير عادية، وهي قدرتها على تغيير الاستجابة الفسيولوجية لتلائم التغيرات الموسمية، حيث وُجد في بعض الأنواع القطبية الشمالية لجنس سيتراريا Cetraria أن درجة الحرارة المثلى تختلف من 7 إلى 21 في أثناء فصل النمو، ويبدو أن الأشنات تستطيع التأقلم للتغير في ظروف الضوء ودرجة الحرارة في أيام قليلة.

التغير الفصلي Seasonal variation

تظهر الأشنات تغيرًا فصليًّا في بعض خواصها الفسيولوجية، ومعدل التمثيل الضوئي هو الأكثر تغيرًا، وهذا يعكس التغير الفصلي في محتوى الكلوروفيل، بينما الفروق في معدل التنفس تكون أقل بكثير، وقد وُجد أن الوزن الجاف لوحدة المساحة للثالوس في البلتيجيرا Peltigera يرتفع بشكل حاد في أواخر الشتاء وأول الربيع، ثم ينخفض في أثناء الصيف، ووُجد أن هناك زيادة مؤقتة في أول الخريف وانخفاض في أول الشتاء، وذلك عندما تكون محصلة البناء الضوئي في أقل مستوى، ووُجد أيضًا أن معدل امتصاص الجلوكوز للجنس نفسه يبدأ بالارتفاع في شهر يناير، ويكون في أعلى مستوى في وقت زيادة الوزن الجاف نفسه، الذي هو غالبًا في شهر مارس، ويبقى في أعلى مستوى حتى شهر يونيو June، ثم ينخفض في أثناء الصيف، وحيث إن موقع امتصاص الجلوكوز هو الطبقة الطحلبية؛ لذا يفترض أن الطحلب يكون في أعلى مستوى نشاطه في أواخر الشتاء وأول الربيع أكثر من أي وقت آخر في السنة، وبشكل عام يلاحظ أن التغيرات الفصلية في الوزن الجاف وفي البناء الضوئي وفي المحتوى المائي وعوامل أخرى تؤثر في معدل النمو الفصلي للأشنات.

فسيولوجي المكونين Component Physiology

للحديث عن الجوانب الفسيولوجية للأشنات ودراستها بشكل مفصل لا بد من تناول المكون الطحلبي والمكون الفطري كلٌّ على حدة، فجسم الثالوس الأشني يشترك فيه كلاهما، ويعملان بتناغم وتوافق فيما بينهما في جميع العمليات الفسيولوجية والحيوية التي يحتاج إليها الثالوس كي ينمو، ويعيش في الوسط الغذائي.

فسيولوجي المكون الطحلبي Physiology of phycobiont

يمكن عزل المكون الطحلبي isolation phycobiont باتباع الخطوات الآتية:

1. غسل الثالوس الأشني لإزالة المواد العالقة وبقدر الإمكان إزالة الطحالب غير الأشنية الموجودة على الثالوس Epiphytes.

2. إزالة (قشر) أجزاء القشرة العليا بواسطة الموس.

3. أخذ قطع من الطبقة الطحلبية ووضعها في الماء على شريحة وحلها بالنقع.

4. عزل الخلايا المفردة مع قطع (أجزاء) الخيوط المتصلة بها مباشرةً بواسطة ماصة دقيقة، ثم تنقل إلى وسط مُغذٍ مناسب، أو توضع الشرائح كاملة في غرفة رطبة، ويضاف إليها الماء والذائبات المعدنية على فترات، أو يمكن أن توضع القطع المستأصلة على بيئة آجار بريستول Bristol’s Medium.

بينما في المزارع طويلة الأجل يمكن أن تحفظ المستعمرات على بيئة آجار محلول ترس غير العضوي المحايد Tris-buffered Inorganic Agar medium، أو بيئة بولد Bold’s Medium، أو بيئات مشابهة، وذلك في أنابيب اختبار أو في دوارق.

ويتطلب المكون الطحلبي كثيرًا من المتطلبات الغذائية Nutrition requirements وتحتاج غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 للقيام بعملية البناء الضوئي، وتنمو أفضل عند إضافة السكريات السداسية، وتستخدم معظم مصادر النيتروجين مع إضاءة نحو 20 Lux.

فسيولوجي المكون الفطري Physiology of Mycobiont

عادةً يفضل عزل الأبواغ للمكون الفطري؛ وذلك لانخفاض احتمال حدوث التلوث، وقد يُوجد في الثالوس الخضري بعض خيوط لمتكافلات جانبية (مجانية) Parasymbionts، ومن ثم لا يمكن التأكد أن الخيوط المعزولة من النخاع تمثل المكون الفطري الحقيقي.

ويمكن أن تمسك الأبواغ المقذوفة بقوة من الثمار القرصية على سطح شريحة مغطاة بالآجار أو على طبق بتري مقلوب، ثم تترك لتنبت، ويمكن عزل الأبواغ مفردة بواسطة لاقط دقيق جدًا

للحصول على مزرعة بوغ واحد، ويمكن أن ينمو المكون الفطري على بيئات آجار صناعية صلبة أو سائلة، وغالبًا تفضل السائلة للتجارب الضابطة؛ وذلك لسهولة جمع الغزل الفطري ووزنه.

ومعدلات نمو المكون الفطري تكون أبطأ بكثير من معدلات نمو الفطريات اللاأشنية، وبعض المكونات الفطرية سريعة النمو على الآجار قد يصل قطرها من 1-2 سم في الشهر، ولكن في الغالب يكون النمو من 1-2 ملم فقط، وأعلى محصول في البيئات السائلة هو نحو 100 ملجم وزن جاف / 25 سم3 بيئة، وهذا أقل من ربع معدل نمو فطرتي Penicillium, وAspergillus.

وقد تصل قمة النمو في وقت قصير مثلًا في 3 أسابيع في جنس Buellia ولكنها غالبًا تأخذ من 5-6 أسابيع. وأخيرًا تتحلل المزارع ذاتيًّا autolysis بعد 2-3 أشهر، وذلك في البيئات السائلة، وحتى في البيئات الصلبة قد يكون من الصعب الحفاظ وعمل مزارع جديدة بعد سنة أو سنتين.

المتطلبات الغذائية للمكون الفطري

يتطلب المكون الفطري كثيرًا من المتطلبات الغذائية Nutrition requirements

مثل الآتي:

1. النيتروجين Nitrogen

الفطريات الأشنية تستخدم معظم الأحماض الأمينية مثل الألينين Alanine، والبرولين Proline، والأسباراجين Asparagine، أو مواد نيتروجينية أخرى مثل نترات البوتاسيوم KNO3 أو نترات الأمونيوم NH4NO3.

2. الكربون Carbon

هناك كثير من مصادر الكربون التي تُستخدم لزراعة المكون الفطري لتعطي نموًّا جيدًا كمعظم السكريات السداسية مثل السكروز Sucrose، والجلوكوز Glucose، والمالتوز Maltose، واللاكتوزLactose، ومانيتول Manitol، والإريثريتول Erythritol، والأسيتات Acetate، بينما تُعدّ السكريات الثلاثية مصادر فقيرة لمعظم المكونات الفطرية في المختبر.

3. الفيتامينات Vitamins

يبدو أن نقص الفيتامينات يكون شائعًا في الفطريات الأشنية، حيث تتطلب أحدًا أو كلًّا من الثيامين Thiamine، والبيوتين Biotin، ومن المعروف أن الطحالب تكون كلًّا من الثيامين، والبيوتين، وفيتامينات أخرى بكميات كبيرة، وهذه قد تكون متاحة للفطر في الثالوس الأشني.

4. الرقم الهيدروجيني pH

الرقم الهيدروجيني للوسط الغذائي له تأثير كبير في تكوّن مزارع المكون الفطري، وكل نوع له رقم أمثل غالبًا يكون فيما بين 5 و6 pH، بينما الرقم الأعلى أو الأقل بكثير سوف يعيق النمو. يوضح نمو كوليما Collema في قيم pH مختلفة، وقد وُجد أن تكوّن الكونيدات في جنس بوليا Buellia يثبط عند القيم التي أعلى من 7 أو أقل من 5.

5. درجة الحرارة Temperature

مدى تحمل المكونات الفطرية للحرارة يبدو واسعًا نوعًا ما، وبشكل عام يحدث أعلى نمو ما بين 20 و 25.

6. الضوء Light

لأن المكونات الفطرية هي كائنات متباينة التغذية Heterotrophes؛ لذا لا يتوقع أن تستجيب للاختلافات في شدة الإشعاعات أو أوقات الإضاءة، والتغير الوحيد لتأثير الضوء في الأشنات هو التغير في اتجاه اللون الأحمر في مستعمرات جنس كوليما Collema، وذلك عندما تطول أوقات الضوء، وتزيد إشعاعاتها، وهذا يدل على زيادة إنتاج الصبغات شبه الكاروتينات Carotenoids.

النواتج في المزرعة Products in culture

بينما يكون الثالوس المركب غنيًّا بالنواتج الأيضية الخارج خلوية كالمواد الأشنية الفينولية، إلا أن المتكافل الفطري المعزول لا يكوّن إلا القليل منها أو لا شيء.

والمكون الفطري في ثالوس كلٍّ من جنس زانثوريا Xanthoria (الشكل 9-7) وكالوبلاكا Caloplaca، ينتج في المزرعة مواد تعرف بالأنثرا كوانونونات Anthra quinones، كالباريتين Parietin، والأمودين Emodin التي لم تكتشف في الثالوس المتكافل حتى الآن، والمتكافل الفطري كلادونيا Cladonia ينتج في المزرعة الدبسيد Dipside وحمض السيكوامات Squamatic Acid، بينما المتكافل الفطري رامالبنا Ramalina ينتج حمض الدبسيدون سالازين Depsidone Salazinic Acid، وفي بعض المزارع ينتج الزوورين Zeorin، وتريتيربينويد Triter penoid، وعددًا من الهوبونات Hopanes التي هي فريدة للأشنات، ويحتمل أن المكون الطحلبي يؤدي دورًا مهمًّا في البناء الإحيائي لتلك المواد التي تُوجد في الثالوس المركب، ولا توجد في المكون المعزول، ومن المعروف أن المكون الطحلبي ينتج بعض التينينات، وهذه قد تكون متاحة للمكون الفطري في الثالوس الأشني.

الشكل (9-7): أشنة زانثوريا Xanthoria الورقية Foliose Lichens.

العلاقات التكافلية والبناء Symbiosis & Synthesis

التكافل Symbiosis هو الاتحاد الإحيائي الحميم المفيد لكائنين حيين، والأشنات التي تجمع الفطريات والطحالب هي أول ما عُرف وما زالت من أفضل الأمثلة لهذه الظاهرة، والصفة المميزة للعلاقات الأشنية هي أن الثالوس يكون بشكل تام ومتزن لكي يعمل بوصفه كائنًا حيًّا مفردًا، وأن الشكل الظاهري ليس فيه تشابه واضح لا مع الفطريات ولا مع الطحالب اللاأشنية، وقبل عام 1866م لم يكن أحد يفهم الطبيعة الثنائية (المزدوجة) للأشنات، وفي عام 1852م تعرف العالم تولاسن Tulasen إلى خيوط تلك الفطريات، وفي عام 1866م عرّف العالم de Bary الأشنات بأنها اتحاد بين كائنين ليس بينهما علاقة.

مفاهيم العلاقات التكافلية Concepts of Symbiosis

تأخذ العلاقات بين الكائنات الحية صورًا متنوعة عدة، وتختلف هذه الصور باختلاف نوع العلاقة ومدى تأثيرها في الطرفين سواءً بالسلب أو بالإيجاب (Goerges et. al. 2006, Hassan et. al. 2017, Coupe & Withers 2012, Fleet 2003)، ومن هذه الصور نذكر الآتي:

التطفل Parasitism

المتطفل Parasite هو كائن حي متباين التغذية يستطيع أن يكوّن علاقة غذائية مع عائل ما Host، وهذه العلاقة تكون في مصلحته، وغالبًا ليست في مصلحة العائل، والمتطفل ذو التغذية الميتة Necrophytic parasite، يهاجم عائله، وفي النهاية يدمره، وذلك غالبًا بواسطة تغلغل الممصات في البروتوبلاست لخلايا العائل.

2. المتطفلات ذات التغذية الحية Biotrophic Parasites

هي نوع من العلاقات التكافلية في الفطريات، حيث يهاجم الفطر العائل، وسرعان ما يكوّن معه علاقة غذائية صديقة، وتمتص المغذيات بواسطة الممصات الداخلية من دون حدوث تلف لخلايا العائل، وهناك صفة مهمة للتغذية الحية Biotrophism وهي أن أيًّا من أفراد هذه العلاقة لا يستطيع أن ينمو وحده، ويعتمد على الآخر ليس للحصول على المغذيات فقط، ولكن للحصول على عوامل نمو معينة.

3. الترمم الداخلي Endo saprophytism

يعتقد بعض العلماء أن الفطريات يمكن أن تعيش على الخلايا الميتة للطحالب، إلا أنه لم يُعثر على خلايا طحلبية ميتة بكميات تكفي لتغذية الفطر.

4. المشاركة (تبادل المنفعة) أو التكافل Mutualism

في الأشنات تعرف هذه العلاقة أيضًا بمصطلح التحالف Consortism وفيها يعتمد أحد أو كل المكونين في الثالوس الأشني على هذه العلاقة للحياة وبناء وتحقيق ما يعجز عن تحقيقه كل كائن بمفرده.

5. التكافل الجانبي (النظير) Parasymbiosis

بعض أنواع الفطريات التي تغزو الثالوسات الأشنية نادرًا ما توجد بعيدة عن الأشنات، وهي ذات علاقة قريبة بالأنواع المترممة على الأشنات والطحالب البحرية، وخيوطها تغزو الثالوس الأشني بأكمله وحتى الأبواغ الكيسية، لكنها لا تكون ثالوسًا خضريًّا مستقلًّا، وتحصل المتكافلات الجانية Parasymbionts على المغذيات من الطحالب.

وبشكل عام يمكن القول: إنه فيما يخص العلاقة الفسيولوجية للمتكافلات Physiological Relationship فإنه خلال علاقة الفطر بالطحلب في الثالوس الأشني فإن الفطر الأشني ينظر إليه بوصفه مترممًا أو متطفلًا؛ لذا يجب أن يجد سبيلًا للحصول على المواد الأيضية العضوية المكونة بواسطة المتكافل الطحلبي، فيحصل الفطر من الطحلب على احتياجاته الغذائية من الكربوهيدرات والفيتامينات ومواد النمو ومصدر إضافي من النيتروجين المثبت بواسطة البكتيريا الزرقاء المكونة للأشنات، ويلاحظ أن الفطر الأشني يكون ذا مدة حياة أطول بكثير من الفطريات الأخرى، ومع أن الثالوس متأقلم للظروف البيئية المتطرفة، إلا أنه حساس جدًّا للتغيرات في الظروف المحيطة الدقيقة التي يمكن أن تفسد التوازن التكافلي، وإن الفطر يعتمد بشكل كامل على العلاقة التكافلية مع الطحلب ليكون ثمارًا جنسية (Holt et. al. 1994).

وفي المقابل فيما يخص علاقات الطحلب بالشريك الفطري في الثالوس الأشني، فإن الطحلب يحصل من الفطر على فوائد في جوانب عدة نذكر منها الآتي:

1. الحماية الميكانيكية من العناصر الضارة، وذلك بسبب إحاطته الجيدة بالخيوط الفطرية.

2. الحماية من الإشعاعات بواسطة الخيوط الفطرية المعتمة.

3. الحصول على الماء، حيث يستفيد من العلاقات المائية المحسنة ومقاومة الجفاف.

4. يستفيد من العناصر المعدنية المتراكمة في الثالوس الأشني بتراكيز عالية، التي تطلق في أثناء أوقات إعادة الترطيب.

5. تحسين نظام التغذية بواسطة تبادل المواد الأيضية مع الفطر بما في ذلك النيتروجين.

6. تحفيز البناء الضوئي، حيث إن الفطريات متباينة التغذية؛ لذا يمكنها إفراز بعض المواد التي تحفز البناء الضوئي في الطحالب.

وتتم العلاقات التكافلية بين المكون الطحلبي والمكون الفطري في الثالوس الأشني من خلال تراكيب تعرف بالممصات الفطرية الأشنية Haustoria، وهي بسيطة عبارة عن خيوط فطرية محورة قليلًا كي تخترق الخلايا الطحلبية أو تتصل بها، وهناك أنواع عدة منها:

1. الممصات الضمن خلوية Intracellular haustoria.

2. الممصات الضمن غشائية Intramembranous haustoria وهي التي تخترق الجدار الخلوي، ولا تخترق الغشاء الخلوي كما في معظم الأشنات الورقية والشجيرية.

3. أعضاء التصاق Appressorial haustoria.

4. الدرنات الأولية Protuberances التي تبرز من خيوط الغلاف الفطري، وتتغلغل في الجدار الخلوي للخلايا الطحلبية.

5. الحويصلات الطحلبية Vesicles Algal التي تكونها بعض الطحالب في نقطة الاتصال لتسهل أكثر عملية انتقال المغذيات.

6. الأنيبيبات الفطرية Fungal Microtubules التي تلاحظ في جنس Collema الذي يحتوي على طحلب نوستوك Nostoc، لا يوجد فيها أي ممصات، لكن المتكافل الفطري يتصل بالحويصلات المتكونة من خلايا الطحلب، وذلك بواسطة أجسام تشبه الأنيبيبات الدقيقة.

ومن الجدير بالذكر أنه في حال عدم تكون الممصات، فإن الخيوط القريبة جدًّا من الخلايا الطحلبية قد تحتوي على انثناءات من الغشاء البلازمي Plasmalemma Invaginations أو لوماسومات Lomasomes خاصة أو تراكيب تشبه الجسيمات الوسطية Mesosomes قرب الغشاء البلازمي.

وتجدر الإشارة هنا إلى أن عملية تكون أو بناء الأشنات Synthesis of Lichens بدءًا من المكون الفطري والمكون الطحلبي وانتهاءً بالثالوس الخصيب لم تتحقق في المختبر، فيما عدا بعض الأشنات القليلة، فقد استخدم بعض العلماء مزارع الثالوس الكامل لإعادة تكون ثالوس جديد من السوريدات Soredia وقطع من الثالوس، حيث أخذ أحد العلماء معلقًا من قطع الثالوس لبعض الأشنات، وحقنها في تربة معقمة، وحضنها في درجات حرارة وإضاءة مختلفة، وذلك في وسط بيئي محكم، فوجد أن هناك نموًّا خضريًّا جيدًا أدى إلى تكون ثالوسات حرشفية صغيرة Squamules، وفي جنس Cladonia تكونت بكنيدات Pycnidia، وبعد 10-18 أسبوعًا أنتجت بعض الأحماض الأشنية، ولكن التلوث أدى إلى تدمير معظم المزارع بعد 18 أسبوعًا (الشكل 6 ف).

وعالم آخر استخدم مزارع وحيدة البوغ ومتعددة الأبواغ، وخلطها مع بعض أنواع جنس Trebouxia في طبق بتري محتويًا آجارًا نقيًّا، وقد لاحظ بدء اتصال خلايا الفطر والطحلب مباشرةً، وتكونت السوريدات Soredia خلال شهر، وبعد 3 أشهر نقلت قطع من الآجار مع المتكافلات إلى أصص فخارية مملوءة بتربة معقمة ومغطاة بطبق بتري، وحضنت في 18 يضاف إليها الماء عندما تجف التربة، تكوّن ثالوسًا حرشفيًّا أوليًّا Squamule بعد شهرين، وتبع ذلك تكوّن الثمار الكيسية القرصية Apothecia والبكنيدات، وتكونت الحوامل شبه القدمية Podetia الكاملة بعد سنة إلا أنها لا تحتوي على قشرة (الشكل 5 ف).

النمو وطول العمر Growth and Longevity

نمط نمو الأشنات الأساسي يكون مركزيًّا، وينمو الثالوس إلى الخارج بشكل موحد في الحواف ليكون مستعمرات دائرية، والأشنات الشجيرية تنمو قميًّا ما يزيد في الطول أو الارتفاع، ومن المعروف أن الأشنات يكون نموها بطيئًا جدًّا، إلا أن عمرها طويل، وأجزاء الثالوس القديمة التي تبقى سليمة يبدو أنها تعمل مدى حياة الأشنة.

قياس النمو Growth Measurement

هناك أربع طرق رئيسة لقياس النمو في الأشنات، وهي:

1. تقنيات الرسم الشفاف Tracing Techniques

هذه تقنية حديثة ملائمة بشكل خاص للدراسات الحقلية السريعة، وذلك برسم خطوط الثالوس على ورق بلاستيك شفاف، وبعد أشهر عدة أو سنوات يعاد رسم الثالوس نفسه، وذلك بوضع الورقة السابقة على الثالوس نفسه، وتقاس الزيادة في قطر الثالوس باختيار نقطة توضع بوصفها مرجعًا على الوسط المغذي أو على الأجزاء القديمة من الفص الأشني.

2. التصوير الضوئي Photography

هذه الطريقة أكثر دقة، ويمكن أن تؤخذ القياسات مباشرة من الصور الضوئية المكبرة المطبوعة، وتقاس الزيادة في قطر الثالوس عادة باختيار نقطة.

والقياس الخطي (الخطوط البيانية) توفر قيمًا مفيدة يكون من السهل مقارنتها مع نتائج أخرى، لكنها لا تعطي صورة دقيقة (صحيحة) عن الزيادة في الكتلة الحيوية، وفي الواقع يبدو أن الزيادة في مساحة الثالوس الأشني تكون أكثر صلة بالكتلة الحيوية من النمو الخطي (الطولي) أو الشعاعي.

ويمكن تحديد المساحة بقياس متوسط الأقطار أو باستخدام المتر المسطح (متر المساحة) ويكون معدل الزيادة في المساحة دالة لحجم الثالوس الأشني.

3. توزيع الحواف إلى مناطق Marginal Zonation

بعض أنواع الأشنات القشرية مثل Buellia، وليكانورا Lecanora، وبيرتوساريا Pertusaria تكون مناطق حافية، وكل منطقة تمثل نمو سنة واحدة، وهذه المناطق تتجه إلي الشحوب في اللون، وتغمر في الأجزاء القديمة من الثالوس، وبعض أنواع بيرتوساريا لها حواف واضحة للـــ 10-15 سنة الماضية.

4. استخدام المواد المؤرخة (القديمة/ المستديمة) Use of Dated Substrates

طريقة استخدام المواد المؤرخة تُعدّ طريقة غير مباشرة لتقدير النمو بواسطة قياس الثالوس على المواد المغذية القديمة المستديمة المؤرخة، على الرغم من أنها طريقة سريعة، وتحل مشكلة الحاجة إلى الانتظار الممل لسنوات عدة، حيث إن الأشنات بطيئة النمو.

وهناك أشياء عدة هي من صنع الإنسان، مثل أعمدة الشبوك والكهرباء والهاتف والسياجات الخشبية واللوحات الإرشادية وحوامل وقواطع الجسور والأبراج والنصب التذكارية المؤرخة وعلامات القبور المؤرخة، فهذه كلها قديمة وشبه مستديمة، وكلها تغزى بواسطة الأشنات.

وإذا عرف أو أمكن تقدير تاريخ أصل المادة، فإنه يمكن تقدير الحد الأدنى للنمو، وذلك بقسمة نصف قطر الثالوس على عدد السنوات للمادة الأصلية، فعلى سبيل المثال: إذا كان نصف قطر الثالوس النامي على عمود شبك وضع في مكانه منذ عشر سنوات هو 15 ملم، فإن معدل نمو الثالوس يكون (15/10) على الأقل 1.5 ملم / سنة.

والصعوبة الأساسية قد تكون في أعمار المواد؛ أي إن تاريخ وضع المادة قد لا يتفق مع تاريخ الغزو بواسطة الأشنات، فقد يكون الغزو بعد 1، 2، 3 سنوات من تاريخ وضع المادة، وذلك بحسب نوع الأشنات وأماكن وجودها والظروف البيئية.

معدل النمو Growth rate

بعض أنواع الأشنات الورقية والشجيرية قد تنمو بمعدل يصل من 10 إلى 30 ملم/ السنة، بينما القشرية بمعدل يصل من 0.5 إلى 2.5 ملم / السنة.

وهناك ما يعرف بالتغير السنوي في معدل النمو Annual Variation فقد يكون هناك تغيرات؛ أي فروق في معدل نمو الأشنات التي تختلف من سنة إلى سنة أخرى، وقد وجد أحد العلماء أن معدلات نمو بارمليا كابيراتا Parmelia caperata كانت 4.28 ملم و3.45 ملم و4.30 ملم خلال 3 سنوات متتالية، وقد يصل التغير إلى 100%، وهذه التغيرات تكون مرتبطة (ذات علاقة) بمعدل هطل الأمطار السنوي وبالتغيرات في درجات الحرارة.

وإلى جانب التغير السنوي هناك التغير الفصلي في معدل النمو Seasonal Variation، حيث لوحظ كقاعدة أنها تحدث أكبر كمية نمو في الربيع أو الخريف في المناطق المعتدلة، مثلًا البارميليا بالتيمورينسيز *Parmelia baltimorensis* تنمو في ولاية ميرلاند الأمريكية في أعلى معدل لها (نحو 0.05 ملم/ اليوم) في شهري مايو ويونيو May and June وذلك عندما تكون كثافة السحب في قمتها ودرجات الحرارة تتراوح من 25 إلى 30 ، بينما نوع البارميليا كابيراتا *Parmelia caperata* الذي هو قريب العلاقة بالنوع السابق، تنمو في بريطانيا إلى 0.09 ملم/ اليوم، وذلك في شهري أغسطس وأكتوبر بحسب الفصل المطير الرئيس.

وفي المناطق الاستوائية يكون النمو أفضل في الفصل الممطر، وقد يتوقف النمو في الفصل الجاف غير الممطر، وفي الحالات الأكثر تطرفًا كما في المناطق القطبية حيث لا يحدث نمو في أشهر الشتاء مستمرة الظلام، بينما يكون النمو ثابتًا إلى حد ما في الصيف عندما لا تغيب الشمس أشهرًا عدة، وإن فترات الرطوبة تؤدي دورًا مهمًّا في التغيرات الفصلية.

نمط النمو وطول وقته Growth patterns & longevity

للأشنات حجم ثالوس أقصى ومدة عمر محددة، فمثلًا كلادونيا Cladonia وبعض الأشنات ذات العلاقة يبدو أن لها نمط نمو أوسيًّا (شبيهًا بحرف S) طبيعيًّا يتألف من ثلاثة أطور هي (الشكل 9-8):

1. طور البداية Initial phase

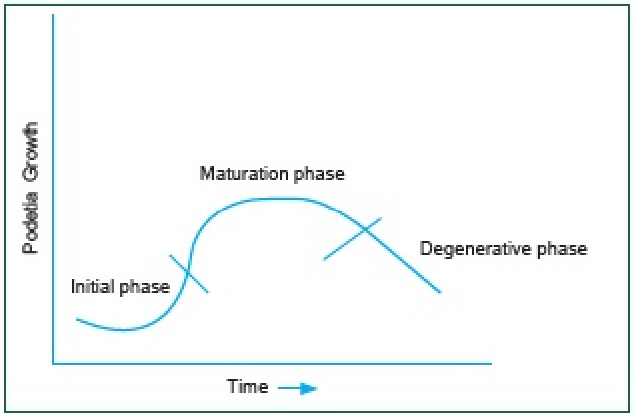
في هذا الطور تنمو وتتفرع الحوامل شبه القدمية Podetia بشكل ثابت ومستمر.

2. طور النضوج Maturation phase

في أثناء هذا الطور تتحلل قواعد الحوامل شبه القدمية بمعدل يساوي معدل النمو القمي.

3. طور التحلل Degenerative phase

وهو وقت التحلل النهائي، حيث يكون معدل تحلل الحوامل شبه القدمية أسرع من نموها، وفي النهاية تموت.



الشكل (9-8): أطوار التكاثر في الأشنات.

القياس الأشني Lichenometry

هو استخدام الأشنات لتقدير عمر (تاريخ) المواد غير المعروفة العمر، والعامل الأساسي المهم في القياس الأشني هو العامل الأشني Lichen Factor: وهو النمو الكلي لأشنة مختارة معينة لكل 100 سنة، ويمكن تقدير ذلك من الصور الضوئية القديمة أو من ركام الحجارة الجليدية المؤرخة أو التصوير الضوئي المباشر على سنوات عدة، فمثلًا إذا كان العامل الأشني لجنس ريزوكاربون Rhizocarpon هو 10-25 ملم/ 100 سنة، وإذا كان قطر مستعمرة الريزوكاربون الموجودة على ركام جليدي معين هو 150 ملم، وبافتراض أن متوسط العامل الأشني = 15 ملم؛ لذا فإن عمر الركام يكون نحو (150/15 100 X)= 1000 سنة.

الأشنات وتلوث الهواء Lichens and Air Pollution

الأشنات حساسة لملوثات الغلاف الجوي التي هي من صنع الإنسان، وقد اختفت الأشنات في عدد من المناطق الصناعية ووسط عدد من المدن الكبيرة في القرن الماضي بسبب التلوث، ويمكن أن تُستخدَم الأشنات في المراقبة الإحيائية Biomonitor لمستويات عدد من المعادن السامة كثاني أكسيد الكبريت SO2، وهذا المجال من أكثر مجالات علم الأشنات شهرة في الوقت الحاضر.

وفيما يخص إحيائية تأثير التلوث Biology of Pollution Effects نجد أن الأشنات تمتص العناصر الهوائية بكفاءة عالية على السطح بأكمله، حيث لا يوجد عل سطح الثالوس تراكيب واقية كالبشرة الشمعية أو الثغور كما هو الحال في النباتات الراقية، وهذه العناصر ترتبط بجدر الخيوط

الجيلاتينية، وتخزن دون حدوث ضرر، أو تمتص بواسطة الطحالب النشطة أيضيًّا التي تدمر أو تموت.

والعناصر السامة تؤدي إلى تدمير الكلوروفيل في الطحالب أو إحداث تغيرات في نفاذية الجدار الخلوي، وخاصةً تدفق البوتاسيوم K، وفي عام 1961م وجد أحد العلماء أن هناك 65 نوعًا من الأشنات في مدينة قوثين بيرق Gothenburg الصناعية في السويد، بينما في عام 1981م لم يجد سوى 38 نوعًا (انخفاض 41%) وقد وجد أن هذا الانخفاض مرتبط بزيادة التلوث في هذه المدينة الصناعية، فعندما تتوقف مصادر التلوث أو ينخفض التلوث فإن الأشنات سوف تعاود استعمار المواقع التي ماتت أو قتلت فيها في السابق.

أنواع الملوثات Types of Pollutants

الملوثات البيئية متنوعة ومتعددة، فمنها الغازات، والزيوت، والمعادن الثقيلة، والمواد المشعة، وبعض المركبات، والأكاسيد الكيميائية، وتُعدّ الأشنات أحد مكونات النظم البيئية المهمة لعدد من السواحل؛ ولذا قد تتأثر بتناثر الزيت Oil spill pollution من البواخر، وقد وُجِد أن الزيت الخام يدمر أو يقتل الأشنات سواءً على السواحل أو في اليابسة، وتُعدّ تأثيرات الإشعاع المتأين Effects of Ionizing Radiation في الأشنات أقل بكثير من تأثيره في النباتات الراقية، والسبب في ذلك لأن ثالوسها الخضري يكون جافًّا وساكنًا معظم الوقت والمناطق المريستيمية تكون منتشرة، إضافة إلى أن حجم المادة النووية أقل والتركيب الكروموسومي أبسط في الأشنات، وفيما يلي نتناول أهم الموثات بحسب الآتي:

1. ثاني أكسيد الكبريت SO_2

هو ناتج جانبي من احتراق الفحم وزيت الوقود ومن صقل المعادن الخام وصناعة الورق وعوادم السيارات وعمليات صناعية أخرى، وعندما يطلق ثاني أكسيد الكبريت SO_2 في الجو يذوب في الماء، ويكون كبريتات Sulphates، وكبريتيدات Sulphites، وحمض الكبريت Sulphouric Acid، والتركيز الطبيعي يتراوح من 0.28-2.8 ميكروجرام/ م3، ولكنه يرتفع إلى 200 ميكروجرام/ م3 قرب مصادر التلوث، والحد الأعلى لمعظم الأشنات هو 60 ميكروجرام/ م3 دون الحد الذي يدمرها أو يقتلها، وكانت الأشنات منتشرة في كل مكان، ولكن في منتصف القرن الماضي، لاحظ علماء النبات انخفاض أعددها أو تدميرها بالكامل، وقد عزوا ذلك إلى التلوث البيئي، ويبدو أن ثاني أكسيد الكبريت SO_2 هو أول السموم الطحلبية Phytotoxins التي أثرت في الأشنات.

2. السموم الكيميائية الضوئية (ذات الطاقة المشعة) Photochemical toxins

هذه السموم تكون غالبًا مصاحبة لملوثات عوادم السيارات في المدن، وإنها تنشأ أيضًا من احتراق الوقود الحجري، وتكون أكثر وضوحًا في المنظر الطبيعي في المدن الصناعية والمزدحمة بالسكان كضباب وضباب دخاني Haze and Smog، ومن أهم العناصر الداخلة في تكوين الضباب الدخاني:

أ) الأوزون $Ozone = O_3$: بينما يكون الأوزون سامًّا لعدد من النباتات الراقية، إلا أن تأثيره المباشر في أشنات جوانب الطرق في المدن الكبيرة يبدو قليلًا، وقد وُجد أن التراكيز العالية منه تؤدي إلى خفض عملية البناء الضوئي Photosynthesis، وقد يكون تأثيره أكبر عندما يرتبط مع ملوثات أخرى كالنيتريت SO_2 والمعادن الثقيلة.

ب) النيتريت SO_2 الذي يتحول إلى نترات الأستيل فوق الأكسيجينية Peroxy acetyl nitrate (PAN).

الذي ينتج من احتراق الفحم، ويكون من 33 إلى 50% للأجزاء الحمضية في المطر الحمضي والباقي SO_2، واستخدام الـ PAN للتطهير في التجارب يحث فقد الكلوروفيل وخفض البناء الضوئي، بنسبة 66%، والسموم الكيموضوئية المنتجة على مساحات واسعة جدًّا بتركيز قليل، يبدو أن لها تأثيرًا حادًّا في الأشنات على المدى الطويل.

3. المطر الحمضي Acid rain

يصبح المطر حمضيًّا عندما يدخل النيتريت وثاني أكسيد الكبريت $SO2$ و$NO2$ بكميات كبيرة إلى كتلة الهواء، وقد تنتقل كتلة الهواء مئات الكيلومترات قبل أن تطلق الملوثات كمطر أو ثلج، والمطر الحمضي يؤثر في أيض الأشنات، وخاصةً التحلل الحمضي للكلوروفيل، وخفض درجة الحموضة pH في الثالوس الأشني، إضافة إلى أن زيادة حموضة المغذيات تقتل أجزاء التكاثر الدقيقة كالسوريدات في الأشنات.

4. المعادن الثقيلة والعناصر الأخرى Heavy metals & Other elements

من أبرز وأهم المعادن الثقيلة المنتشرة في البيئة المحيطة نذكر ما يلي:

أ) الرصاص lead (Pb)

يُعدّ الرصاص أهم ملوث معدني في الغلاف الجوي، ومصدره الرئيس في المدن هو مشتقات البترول الرصاصية (البنزين المحتوي على الرصاص Tetra ethyl lead gasoline) وفي المناطق الصناعية والريفية من عمليات احتراق الفحم أو صهر المعادن، ويصل الرصاص إلى الثالوس الأشني بوصفه جسيمات هوائية (هباء هوائي) aerosols وخاصة كمعدن جاف متساقط أو

كمطر حمضي، ثم يمتص ويرتبط مع المواقع الأيونية غير الذائبة، ويتراكم خارج الخلايا في الأنسجة الفطرية، وقد يصل إلى مستوى أقصى نحو 2000 جزء/ المليون، وقد وُجد أن الرصاص يؤدي إلى اختزال عملية تثبيت الكربون.

وتُعدّ الأشنات راصدات (مؤشرات) إحيائية جيدة لتساقط الرصاص من عوادم السيارات على الطرق السريعة، وقد وُجِد أن الأشنات الورقية تحتوي على نحو 2000 جزء/ المليون على طريق قرب العاصمة الأمريكية يمر عبره نحو 110 ألف سيارة/ اليوم، بينما القيم الطبيعية لتلك الأنواع هي أقل من 250 جزء/ المليون، وتقدير محتوى الرصاص يكون مهمًّا في تكوين قاعدة بيانات رقمية لمقارنة الزيادة في الرصاص في المحيط الجوي، وكمثال على ذلك، فقد قام العالم لوري Lowrey باستخدام نوع من جنس بارميليا Parmelia لرصد وتتبع مستويات الرصاص في الموقع نفسه، ووجد أن الرصاص:

في عام 1907م كان 80 جزء/ المليون.

وفي عام 1938م كان 130 جزء/ المليون.

وفي عام 1980م كان 340 جزء/ المليون.

ب) الفلورين (F) Fluorine

الفلورين هو غاز سام والفلوريدات Fluorides التي هي مركبات من الفلورين وعناصر أخرى هي نواتج جانبية من عمليات صهر الألومنيوم والزنك والفوسفات، وتوجد في الرماد المتطاير من احتراق الفحم في محطات توليد الكهرباء، وقد وُجد أنه يحدث تلفًا بالغًا للثالوسات الأشنية الخضرية، وذلك حول مصنع كيميائي في ولاية بنسيلفينيا الأمريكية، ووُجِد أن هناك علاقة بين تركيز محتوى الفلورين في الأشنات والمسافة من مصدر التلوث، ووُجد أيضًا أن المحتوى الأساسي للفلورين قرب مصنع افتتح حديثًا في بريطانيا هو 9-15 ملجم/ جم وزن جاف، وبعد سبع سنوات زاد إلى 241 ملجم/ جم وزن جاف، وبشكل عام يبدو أن تأثير الفلورين المدمر للأشنات يبدأ من تركيز 50-70 جزء/ المليون.

ج) النيكل (Ni) Nickel

هو ناتج جانبي من احتراق الفحم وعوادم السيارات والعمليات الصناعية، ويمتص بواسطة الخلايا الطحلبية Algal Cells في الثالوس الأشني، ويؤثر في فسيولوجيا الخلية مباشرة.

د) الزئبق (Hg) Mercury

يُعدّ الزئبق أحد مكونات التلوث في الهواء غير الرئيسة، ويتراكم في الأشنات بسهولة.

هـ) الخارصين (الزنك) Zinc (Zn).

هو أحد عوادم السيارات، ويدمر الأشنات عند التراكيز من 200 – 600 جزء/ مليون، وهذه القيم توجد غالبًا قرب مصاهر الزنك، وإنه يزيد من حموضة المطر في تلك المناطق.

الأشنات بوصفها كواشف للتلوث Lichens as Pollution Monitors

هناك ثلاث طرق رئيسة تستخدم فيها الأشنات لتقدير تلوث الهواء الجوي، وهي:

1. تحليل المحتوي العنصري Assay of Elemental Content

يتم تحليل المحتوى العنصري وذلك لقياس الملوثات الفعلية المتراكمة في الثالوس، بواسطة استغلال القدرة العالية للأشنات على امتصاص وتخزين السموم النباتية (الطحلبية) Phytotoxins، وباستخدام هذه المعلومات يمكن تقدير (استنتاج) وجود ومكان ومسافة انتقال الملوثات، والأشنات تجمع عددًا من الملوثات، بعضها تخزن من دون إحداث ضرر والبعض الآخر يقتل الأشنات في النهاية، وغالبًا تجمع جرامات عدة من الثالوس الأشني من مواقع ملوثة مختلفة، ثم تطحن، وتعامل بأي طريقة متوافرة من الطرق الكيموفيزيائية الكثيرة.

والعناصر التي تحلل عادة هي: الكالسيوم Ca، والكادميوم Cd، والكروميوم Cr، والنحاس Cu، والفلورين F، والحديد Fe، والمغنسيوم Mg، والمنجنيز Mn، والنيكل Ni، والرصاص Pb، والكبريت S، وعدة عناصر أخرى، ثم تقارن هذه المحتويات مع محتويات الأشنات نفسها في حالتها الطبيعية البعيدة عن مصادر التلوث.

2. عمل خرائط Mapping

أبسط طريقة لاستخدام الأشنات في مراقبة التلوث هي عمل خرائط (مربعات) لوجود وتوزيع الأنواع الأشنية حول مصادر التلوث، ثم تقارن (تربط) بالصفات الفلورية أو الخضرية للأشنات بتراكيز SO_2 أو ملوث آخر في المحيط القريب منها، ومثال على ذلك، نجد أنه في أوروبا وُجد أن نوع هيبوجيمنيا فيسودس Hypogymnia physodes الشائع استخدامه بوصفه كاشفًا للتلوث، يموت عندما يزيد SO_2 على 60-70 ميكروجرامًا/ م3، وهذه الطريقة تعطي تقديرًا تقريبيًّا للمسافة واتجاه سقوط الملوثات، وإن التصوير الضوئي للمواقع التي عمل لها خرائط تساعد كثيرًا، حيث توفر سجلًّا تراكميًّا للأنواع الموجودة التي يمكن مقارنتها بعد فترات طويلة عدة بصور ضوئية جديدة.

3. شتل الثالوسات الأشنية Transplants of Lichen Thalli

وذلك بشتل ثالوسات أشنية سليمة (غير ملوثة) من مناطق غير ملوثة وزراعتها في المناطق الملوثة، ثم قياس كمية التلف (الموت) الذي يحدث لها في هذه المناطق، فمثلًا أخذ قطع من جذوع الأشجار التي تحتوي على نمو أشنات سليمة ونقلها إلى المكان الملوث وتسجيل كل الملاحظات التي تحدث لها.

التصنيف والتعريف Taxonomy & Identification

هناك عدد من الصفات والمميزات التي تستخدم لتعريف الأشنات، ومنها:

أ) صفات العائلة Family Characters.

1. شكل النمو Growth form.

2. الأبواغ Spores.

3. تطور الثمرة الزقية Ascocarp Ontogeny.

ب) الصفات الوراثية Genetic Characters.

1. شكل النمو Growth form.

2. الأبواغ Spores.

3. صفات الثمرة الزقية Ascocarp Characters.

4. الكونيدات الدقيقة Microconidia.

ج) صفات النوع Species Characters.

1. الصفات الخضرية Vegetative Characters.

2. الأبواغ والكونيدات الدقيقة Sopres & Microconidia.

د) الاستخدام الكيميائي Use of Chemistry.

1. اختلاف الألوان (وجود صبغات ملونة) Different Pigments.

2. وجود مركبات كيميائية مختلفة Different Chemicals، حيث يوجد نحو 300 مركب كيميائي في الأشنات.

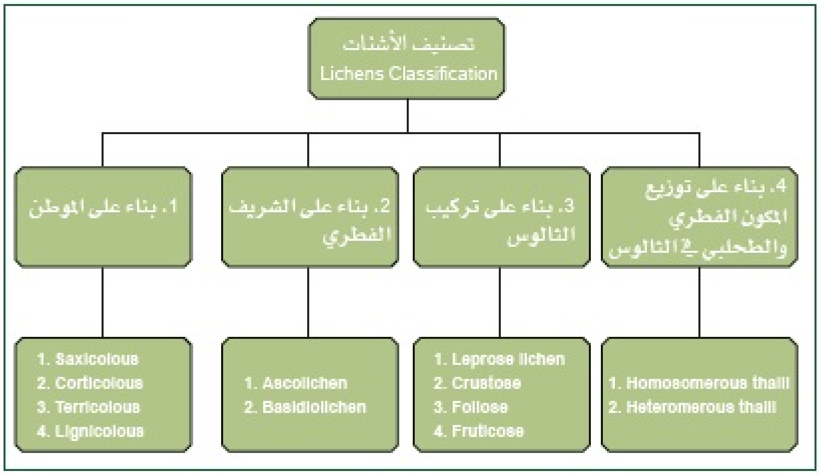
3. الأنواع الكيميائية Chemical species للنوع نفسه، إذا تشابهت الأنواع في جميع الصفات المشاهدة، ولكنها اختلفت كيميائيًّا، فيوضع أنواع كيميائية مرقمة بحسب نوع المركب الكيميائي، فمثلًا النوع المفرد من كلادونيا كلوروفي Cladonia chlorophaea يحتوي على أربع سلالات كيميائية Chemical Strains للـنوع الكيميائي Chemotype وذلك بحسب المواد الكيميائية الموجودة في السلالة.

Strain	1	2	3	N		1	2	3
Acid	A	B	C	X		A	B	A+B

وهناك عدد من الأدوات المساعدة للتعريف Identification Aids مثل عدسات يدوية وأدوات جمع العينات مثل سكين، وقاطع، وفأس، ومطرقة، ويمكن جمع عينات من الأشنات على مدار السنة.

التقسيم Classification

هناك نحو 20 ألف نوع من الأشنات يضاف إليها نحو 100 نوع جديد سنويًّا، والأشنات تضم أحد أكبر مجاميع الفطريات المعروفة، الغالبية العظمى منها من الفطريات الكيسية اللاغطائية Inoperculate Ascomycete التي ليس لها غطاء في قمة الكيس الزقي، وهناك بعض أنواع الفطريات المسماة المتكافلات الجانبية Parasymbionts أو المتطفلات أو الفطريات العائشة على الأشنات Lichenicolous Fungi التي تشكل مجموعة كبيرة انتقالية، وهذه المجموعة بما فيها الفطريات الناقصة الخيطية Hypho mycetes و Coelo mycetes تنمو على الثالوسات الأشنية، وتحصل على غذائها من العوائل الطحلبية، ولكنها لا تزال تحتفظ بحالة تكافلية؛ ولأن الثالوسات والأجسام الثمرية هي فطرية من حيث التركيب، لذا يكون من المنطق تقسيم الفطريات بالنظام نفسه، سواءً كانت أشنية أو غير أشنية، وقد اتفق على ألا تدخل الطحالب في تقسيم الأشنات، ويعتمد تصنيف أو تقسيم الأشنات على متغيرات عدة كما في الشكل (9-9)، فقد يبنى التصنيف على الموطن أو على نوع الشريك الفطري أو على تركيب الثالوس أو على توزيع المكون الفطري والمكون الطحلبي في الثالوس، وهكذا.


تصنيف الأشنات
Lichens Classification
4. بناء على توزيع المكون الفطري والطحلبي في الثالوس
3. بناء على تركيب الثالوس
2. بناء على الشريف الفطري
1. بناء على الموطن
1. Homosomerous thalli
2. Heteromerous thalli
1. Leprose lichen
2. Crustose
3. Foliose
4. Fruticose
1. Ascolichen
2. Basidiolichen
1. Saxicolous
2. Corticolous
3. Terricolous
4. Lignicolous

الشكل (9-9): طرق تصنيف الأشنات وتنوع الأشنات بناءً عليها.

الأهمية الاقتصادية والتطبيقات Economic uses & Applications

لا شك أن الأشنات تشكل مكونًا مهمًا في النظام البيئي في الأوساط البيئية التي تعيش فيها، فتؤثر فيما حولها وتتأثر به، فالأشنات لها تطبيقات عدة في حياة الإنسان، ويستخدمها الإنسان في جوانب عدة وتطبيقات متنوعة، والحديث عن الأهمية الاقتصادية يتطلب تناول كلٍّ من الاستخدامات المفيدة والتأثيرات الضارة للأشنات.

أولًا: الاستخدامات الاقتصادية.

1. الأشنات بوصفها غذاء Lichens as Foods.

تستخدم الأشنات في نواحٍ عدة من الجوانب الغذائية سواءً في غذاء الإنسان أو غذاء الحيوان أو غذاء الحشرات واللافقاريات الأخرى، وفيما يأتي تفصيل لهذه الاستخدامات:

أ) غذاء الإنسان Human food

هناك عدد من السجلات عن استخدامات الأشنات بواسطة الإنسان في المناطق الشمالية وتحت القطبية الشمالية، وخاصة في أوقات المجاعات، حيث يمكن أن تخلط الأشنات مع الدقيق أو تُغلى إلى أن تكون مستخلصات جيلاتينية، وهناك عدد من القبائل في الهند وغرب كندا والولايات المتحدة الأمريكية يجنون (يحصدون) الأشنة القشرية البنية بريوريا Bryoria، وهي أشنة صنوبر شائعة الانتشار في تلك المناطق، ويطبخونها، ثم يأكلونها، وفي اليابان يجمعون أشنة الصخر الورقية أمبيليكاريا Umbilicaria التي تسمى فطرة الصخر Rock Fungus من المناطق الجبلية، ويأكلونها مع السلطات أو مقلية.

ب) غذاء حيوانات الرعي Grazing Animals

تُعد الأشنات مصدر غذاء مهم لعدد من الغزلان، وخاصة في السهول الجرداء والغابات تحت الاستوائية، وقد يصل غذاء هذه الحيوانات من الأشنات إلى نسبة تتراوح من 30-60% في فصل الشتاء، ومن أشهر أشنات الغزلان الكلادونيات Cladonias، والكلادينات Cladinas، والستراريات Cetrarias، واليوسني Usnea، والبلتيجيرا Peltigera، وبريوريا Bryoria.

ج) غذاء للحشرات واللافقاريات الأخرى Insects & other invertebrates

تُعدّ الأشنات مصدر غذاء مهم لليرقات والقواقع الأرضية، وإن الحشرات تتغذى بشكل رئيس على الأشنات، كالبارامليا Paramelia، والهيبوجمنيا Hypogymnia، وليكانورا Lecanora، وبعض الحشرات تستخدم الأشنات للتمويه، وبعضها تستخدم قطع الأشنات لتكون غطاء خارجيًّا، وتغطي نفسها فيها.

2. الاستعمالات الطبـيـة Medical Uses

كانت الأشنات في العصور الوسطى تستخدم بواسطة مزاولي مهنة الطب مثل لوباريا Lobaria، وبارميليا Parmelia، وتستخدم بلتيجيرا Peltigera لعلاج داء الكلب؛ ولذا عرفت بأشنة الكلب Dog lichen، وما زالت بعض الأشنات تستخدم في الطب الشعبي مثل: اليوسني Usnea، وستراريا Cetraria، وبلتيجير Peltigeraا، وديكتيونيما Dictyonema.

وعلاوة على ذلك، فإن بعض الأشنات لها خواص المضادة الحيوية Antibiotic Properties، فبعض أنواع المركبات الأشنية وبعض مشتقاتها لها خواص مضادة حيوية، وهي تؤثر في أنواع عدة من البكتيريا الموجبة لصبغة جرام (gram+) بينما لا تؤثر في السالبة لصبغة جرام (gram-) مثل حمض Usnic Acid، وإن بعضها لها خواص مضادات فطرية، مثل الدبسيدات depsides، وحمض اليوسنك usnic acid، وغيرها، وبعضها تستخدم بوصفها مضادات حيوية لبعض أمراض النبات، مثل قرحة الطماطم، ومنها ما يكبح إنبات البذور، وتكون الجذور في النباتات العشبية، وبعضها يؤثر في الأورام السرطانية.

3. الأشنات في الصبغ وصناعة العطور Lichens In dyeing & perfumery

كانت الأشنات وما زالت تستخدم بوصفها مواد ملونة لصبغ الأخشاب والملابس، مثل باراميليا Paramelia، وروسيلا Rocella، وغيرها. وإن مستخلصات الأشنات من الزيوت العطرية وبعض مشتقات الدبسيدات depsides ذات أهمية تجارية في صناعة العطور، وتضاف بعض هذه المستخلصات إلى الصابون؛ لتعطيره.

4. استعملات متنوعة Miscellaneous Uses

الأشنات الشجيرية مثل الكلادونيات Cladonias تُستخدَم غالبًا لعمل نماذج عمرانية وشكلية، أو تستخدم بوصفها أشكالًا مطابقة للأشجار والشجيرات، وغالبًا يضيف أصحاب محالّ الزهور الكلادونيات إلى باقات الزهور والحدائق الصغيرة لعمل الديكور، وفي أوروبا تُستخدَم بعض الأشنات ذات الألوان الزاهية لعمل الديكورات والملابس الشاذة في الأعياد والمناسبات، مثل أشنة الغزلان كلادونيا Cladonia، والبارميليات Parmelias، وزانثوريا Xanthoria، وبعض أنواع الأشنات تُستخدَم في الاكتشافات الجيولوجية للمعادن، فمثلًا وجود الستراريات Cetrarias يدل على وجود كربونات الكالسيوم على شكل ترسبات الجير الخام، وليكانورا Lecanora تدل على وجود النحاس، وإن بعض أنواع الطيور تستخدم الأشنات لبناء أعشاشها أو لتغطيتها، مثل أنواع بارميليا Parmelia، وبعضها قد تجمع خمسة عشر نوعًا من الأشنات لبناء العش الواحد.

5. استخدام الأشنات بوصفها كواشف إحيائية للتلوث Biomonitors

ذكرنا سابقًا أن هناك ثلاث طرق رئيسة تستخدم فيها الأشنات لتقدير تلوث الهواء الجوي: أولها تحليل المحتوى العنصري Assay of Elemental Content، وذالك لقياس الملوثات الفعلية المتراكمة في الثالوس، والطريقة الثانية هي عمل خرائط Mapping، وتُعدّ أبسط طريقة لاستخدام الأشنات في مراقبة التلوث، وذلك من خلال عمل خرائط لوجود وتوزيع الأنواع الأشنية حول مصادر التلوث، ثم تقارن بالصفات الفلورية أو الخضرية للأشنات بتراكيز الملوث في المحيط القريب منها، بينما الطريقة الثالثة تكمن في عمل شتل الثالوسات الأشنية Transplants of Lichen Thalli، وذلك بشتل ثالوسات أشنية غير ملوثة من مناطق غير ملوثة وزراعتها في المناطق الملوثة، ثم قياس كمية التلف الذي يحدث لها في هذه المناطق بسبب التلوث.

ثانيًا: التأثيرات الضارة Harmful Effects

من الجدير بالذكر أنه في مقابل الاستخدامات الاقتصادية المفيدة هناك تأثيرات ضارة Harmful Effects للأشنات، تؤثر بطريقة مباشرة أو غير مباشرة في حياة الإنسان وبعض مكونات البيئة.

- بعض المركبات الأشنية مثل حمض اليوسنك Usnic acid تسبب حساسية للجلد، وإن السوريدات قد تسبب حساسية عند بعض الأشخاص.

- وتجمع كميات كبيرة من العناصر الهوائية المخزنة بواسطة الأشنات التي قد تحتوي على بعض العناصر المشعة أو السامة التي تؤثر في السلسلة الغذائية.

- وإن الأشنات ذاتية التغذية التي توجد على الأشجار Epiphytic Lichens قد تؤثر في الأشجار، وذلك من خلال التغلغل الكثيف لأشباه الجذور Rhizines في طبقات الفلين، والقشرة، والكامبيوم، والخشب الحي.

- بعض الأشنات الورقية التي توجد بغزارة على الأوراق الخضراء لبعض الأشجار الخشبية والسراخس تؤدي إلى إحداث جروح في البشرة والطبقة البرانشيمية ما يؤدي إلى دخول الكائنات الحية الدقيقة الممرضة.

- بعض أنواع الأشنات توفر ملجأ، أو تحتضن الحشرات الضارة.

- وجود الأشنات على المباني والنوافذ والأبواب القديمة الأثرية يسبب تشوهها وتلفها، وذلك قد يكون بسبب التفاعل الكيميائي للمواد الأيضية على هذه المواد الأثرية أو بسبب وجود الثالوسات الأشنية على هذه المواد.

الفصل العاشر

التطبيقات الحديثة للتفاعل بين الأحياء الدقيقة

Applications of Microbial Interactions

- ◄ أنماط تفاعلات الأحياء الدقيقة.
- ◄ التفاعلات الفريدة للأحياء الدقيقة.
- ◄ تنظيم تفاعلات الأحياء الدقيقة.
- ◄ التنظيم الجزيئي لتفاعلات الأحياء الدقيقة.
- ◄ الجوانب التطبيقية للتفاعلات الميكروبية.
- ◄ الأهمية البيئية لتفاعلات الأحياء الدقيقة.
- ◄ البيئات الغذائية لعزل الأحياء الدقيقة.

الفصل العاشر

التطبيقات الحديثة للتفاعل بين الأحياء الدقيقة

Applications of Microbial Interactions

منذ مدة طويلة مضت، كانت التفاعلات بين الأحياء الدقيقة تُعدّ فقط مثبطة في الطبيعة، ومع ذلك، فقد أظهرت أحدث التطورات في البحث العلمي أنه داخل بيئتنا، وتوجد فئات عدة من الكائنات الحية الدقيقة التي تنتج منتجات مختلفة عند التفاعل فيما بينها، ومن ثم تتبنى نطاقًا أوسع من الجوانب التطبيقية المفيدة للبشرية والقيمة المحتملة بخلاف التضاد البسيط؛ لذلك يشرح هذا الفصل أنواعًا مختلفة من التفاعلات بين الأحياء الدقيقة، ويصف دور العوامل الفيزيائية، والكيميائية، والإحيائية، والوراثية المختلفة التي تنظم مثل هذه التفاعلات، ويشرح آلية عمل تكوين الأغشية الحيوية ودور الأنشطة الأيضية الثانوية التي تنظم تفاعل البكتيريا والفطريات، ويتم التركيز والتركيز بشكل خاص على التفاعلات الميكروبية التي تُعدّ مهمة في الطب وصناعة الأغذية والزراعة والبيئة. باختصار، يكشف هذا الفصل المساهمات الأخيرة للتفاعل بين الأحياء الدقيقة لمصلحة البشرية ورفاهية الإنسان.

والكائنات الحية الدقيقة مثل البكتيريا، والفطريات، والطحالب، وبعض الطفيليات مثل الطلائعيات، والفيروسات تختلف في الأشكال والحجم والتشكل السطحي في البيئات والأوساط الغذائية التي تنمو فيها (Ullah et al. 2017b, Kiprono et al. 2018a, Shi et al. 2018) وغالبًا ما تظهر في الطبيعة أنها شكلت بعض الشبكات البيئية التفاعلية المعقدة داخل النظام البيئي بدلًا من وجودها بوصفها خلايا عوالق مفردة، ويمكن أن تكون هذه التفاعلات بين الكائنات الحية الدقيقة وبين الأنواع نفسها أو مع أنواع مختلفة، أو حتى بين الأجناس والفصائل المختلفة تمامًا، والأنماط التفاعلية داخل هذه الشبكات التفاعلية للأحياء الدقيقة إما أن تكون إيجابية (كسب) أو سلبية (خسارة) أو محايدة، حيث لا يوجد أي تأثير على الإطلاق في الأنواع المتفاعلة، وتوفر الارتباطات المختلفة للربح والخسارة والحيادية التي تحدث بين الشركاء المتفاعلين أساسًا لأشكال متنوعة من الأنماط التفاعلية، ويمكن استخلاص مثال نموذجي لهذا السيناريو من البكتيريا ذات الأصناف المختلفة التي يمكن أن يؤدي ارتباطها إلى تطوير غشاء حيوي الذي قد يؤدي في النهاية إلى جعل الأعضاء الأفراد مقاومين للمضادات الحيوية، ويطلق على العلاقة الناتجة المربحة للجانبين التبادلية (Faust and Raes 2012). وفي عالم اليوم الحالي، يمكن أن تتوج الأنماط التفاعلية المختلفة المذكورة في كثير من المخرجات المتنوعة؛ بعضها يكون له تطبيقات مفيدة في مختلف التخصصات مثل التدخلات الصحية، وصناعة الأغذية، والزراعة، والبيئة، و... إلخ.

ومن ناحية أخرى، فإن توظيف التفاعلات بين المجتمعات الميكروبية مفيد في معالجة مياه الصرف الصحي (Werner et. al., 2011) وإنتاج الغذاء (Mounier, 2008) والوقاية من الأمراض وعلاجها، فعلى سبيل المثال، علاج تسوس الأسنان (Marsh, 1994)، ومرض التهاب الأمعاء (Maloy and Powrie, 2011)، والسمنة (Ley et. al. 2006, Blekhman et. al. 2015). على سبيل المثال، يتم استهداف النظام البيئي للأمعاء بشكل أساسي لأغراض النمذجة في حالة مرض التهاب الأمعاء والسمنة، ومع ذلك هناك حاجة إلى مزيد من الجهود لتطوير نماذج لميكروبات الأمعاء، وأصبح الفهم المعزز لتأثير مجتمعات الكائنات الحية الدقيقة والفهم الأفضل للآلية الدقيقة لتشغيل هذه المجتمعات أولوية، وتؤثر المجتمعات الميكروبية في الحياة على نطاق واسع في مختلف التخصصات، فعلى سبيل المثال، تؤثر الكائنات الحية الدقيقة المرتبطة بالإنسان في الصحة، وتحدد الميكروبات البيئية استدامة النظام البيئي، وتتوسع العمليات الصناعية التي تحركها الكائنات الحية الدقيقة، وفي ضوء مجموعة واسعة من التطبيقات، تم إنشاء كثير من الوسائل لتحليل المجتمعات الميكروبية ووصفها (Zaccaria et. al. 2017).

غالبًا ما تقوم الكائنات الحية الدقيقة بتعديل أنماطها الظاهرية وعمليات التطوير الخاصة بها، مثل تكوين الأغشية الحيوية أو التكوُّن، وتميل إلى التصرف مثل عوامل الضراوة في التفاعلات التكافلية والممرضة التي تنطوي على أعضاء إضافيين داخل اتحاد، ويوجد سيناريو للعلاقات الفريدة من التبادلية، حيث يتم استخدام قدرات التوليف الكيميائي للأعضاء من قبل الكائنات المضيفة التي تؤويهم لمنع نمو أي منافسين محتملين آخرين من أجل الحفاظ على نمط حياة فريد معين (Sheth and Taga 2017). ومن ثم، أدت الشبكات المعقدة من الدراسات البيئية للكائنات الحية الدقيقة إلى فهم واضح للعمليات الإحيائية الأساسية، واكتشفت عوامل الضراوة الحميدة، وطوّرت كثير من المواد المحتملة التي يمكن استخدامها بوصفها أدوية. ومع ذلك، فإن التحدي الرئيس هو ابتكار وسائل يتم من خلالها ضمان سلامة الأغذية وضمانها من خلال الحد أو القضاء التام على الملوثات من الأسطح التي يتم مناولة الطعام فيها (Tshikantwa et. al. 2017). ويمكن تعزيز هذه الإزالة أو التقليل منها من خلال منع التعلق أو تدمير تجمع الخلايا البكتيرية لتشكيل الأغشية الحيوية. ومع ذلك، فإن الظروف التي تفضل تكوين الأغشية الحيوية والارتباط النهائي غير واضحة، ومن ثم فقد ركزت معظم الدراسات على الكشف عن الآلية التي ينطوي عليها تكوين الأغشية الحيوية الرقيقة، وتُعدّ إجراءات الإدارة والوقاية في تكوين الأغشية الحيوية الرقيقة هي المعوقات الرئيسة، ومن ثم، فإن المراجعة الشاملة ستوفر بوابة لتوقعات أفضل إدارة ممكنة، ومن ثم، فإن المراجعة الحالية تناقش الأنماط التفاعلية المختلفة للكائنات الحية الدقيقة وآليات التحكم فيها، وعلاوة على ذلك، فإنها تكشف عن آليات مفيدة مختلفة بهدف توفير قاعدة لحل كثير من التحديات التي تهدد الحياة مثل الرعاية الصحية، والطب، والزراعة، والبيئة، والأغذية، والمشروبات.

أنماط تفاعـــلات الأحيـاء الدقيقـــة

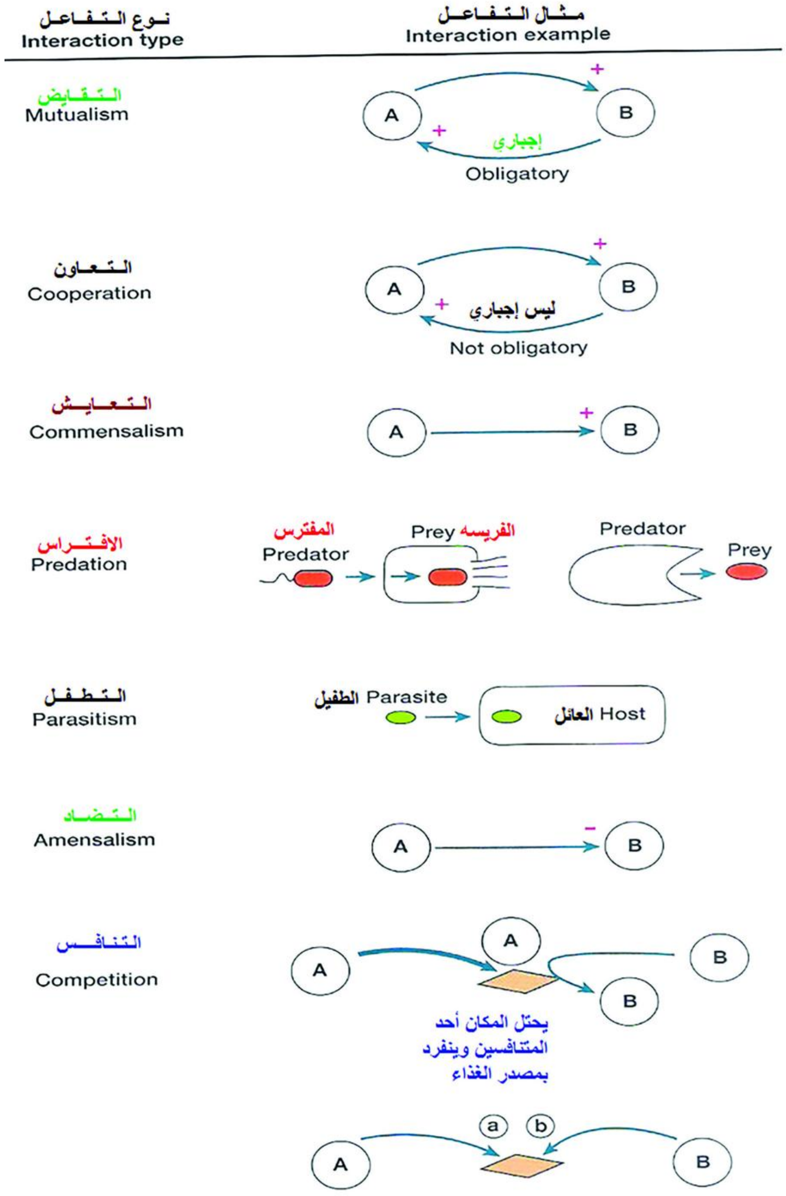
Classes of Microbial Interactions

تتنوع العلاقات التي تحكم التفاعلات بين الكائنات الحية الدقيقة فيما بين العلاقات السلبية والإيجابية والحيادية (الشكل 10-1)، فمنها ما يعرف بالتقايض Mutualism الذي يشير إلى نموذج تفاعلي يشمل جميع الارتباطات البيئية و(التعاون) الذي يصف العلاقة المتبادلة بين الميكروبات الفردية على عكس المجموعات (Faust and Raes 2012). ومن ثم، فإن تعايش الشركاء المتفاعلين يفيد كلا العضوين وفقًا لذلك، وتوجد عادة مصلحة مشتركة بين أعضاء المجتمع المشترك في مثل هذه العلاقة.

فعلى سبيل المثال، تميل البكتيريا عادة إلى توليف بعض العوامل الأيضية التي يتم إطلاقها في النهاية إلى الجزء الخارجي من الخلية عبر غشاء الخلية، وأحد الأمثلة على المستقلبات الناتجة التي يتم إنتاجها في أثناء التفاعلات الميكروبية المتبادلة هو حاملات الحديد، وهذه عبارة عن منتجات جزيئية كاسحة للحديد تنتجها مجموعات عدة تصنيفية للبكتيريا والفطريات؛ ونظرًا لأن توافر الحديد في البيئة الطبيعية ضئيل للغاية؛ نظرًا لظهوره في شكل غير قابل للذوبان (Fe-III)، فإن الحديد المعدني يُعدّ عاملًا مقيدًا رئيسًا في أثناء نمو البكتيريا؛ لذلك تميل الخلايا الميكروبية إلى تلبية هذا القيد عن طريق تخليق أنزيمات معينة يتم إطلاقها في النهاية في الفراغات الخلوية، حيث يصبح الحديد متاحًا بسهولة (West and Buckling 2003)؛ لذلك يتم عزل الحديد بواسطة حاملات الحديد، ما يجعله متاحًا أيضيًّا للخلايا البكتيرية.

وهناك مثال نموذجي على المنفعة المتبادلة بين الأفراد المتفاعلين يُلاحَظ في أثناء تخمير العجين المخمر، حيث يحدث تفاعل تآزري بين الخمائر مثل *Saccharomyces exiguous* أو *Candida humilis* وبكتيريا lactic acid (LAB)، خاصة *Lactobacillus sanfranciscensis*، وتتمثل آلية عمل هذا المسار الأيضي في أنه عندما يتم إطلاق سكر المالتوز Maltose بفعل خميرة الأميليز على مادة النشا الذي يتم استقلابه الأيضي بواسطة *L. sanfranciscensis*، يصبح مكون الجلوكوز (مشتق المالتوز) منتجًا متاحًا لبكتيريا *L. sanfranciscensis*.

وينتج عن هذا توفير الكربون من خلال الخمائر سالبة المالتوز، ونتيجة لذلك، يتم تحفيز نمو L. sanfranciscensis بواسطة الخميرة؛ لأنها تزيد من تركيز الأحماض الأمينية والببتيدات عن طريق تحلل البروتين أو التحلل الذاتي المتسارع (De Vuyst and Neysens 2005) وتعمل كثير من المنتجات الطبيعية لبكتيريا وفطريات معينة بوصفها مصادر غنية بالعقاقير المفيدة للمضادات الحيوية والعلاج الكيميائي مثل الأدوية المضادة للسرطان، ومثبطات المناعة، وأدوية خفض الكولسترول، والعلاجات التي تستخدم عادة للحد من بعض الحالات الطبية الحرجة.


نوع التفاعل
Interaction type
مثال التفاعل
Interaction example
التقايض
Mutualism
A
B
+
+
إجباري
Obligatory
التعاون
Cooperation
ليس إجباري
Not obligatory
التعايش
Commensalism
الافتراس
Predation
المفترس
Predator
الفريسه
Prey
Predator
Prey
التطفل
Parasitism
الطفيل Parasite
العائل Host
التضاد
Amensalism
-
التنافس
Competition
يحتل المكان أحد المتنافسين وينفرد بمصدر الغذاء
a
b

الشكل (10-1): أنماط التفاعل بين الأحياء الدقيقة.

علاوة على ذلك، فقد كشفت دراسة حديثة أن بعض الأنواع البكتيرية، على سبيل المثال Staphylococcus epidermidis، وجد أنها تنتج N-hydroxyaminopurine-6 (HAP-6) الذي يعيق نمو الورم السرطاني عن طريق تثبيط نشاط أنزيم البوليميريز DNA، فقد لوحظ أن HAP-6 يقوم بوظيفة انتقائية مضادة للتكاثر ضد خطوط الخلايا السرطانية المحولة، وقمع النمو المستحث، ويعيق التخليق عن طريق التعرض للأشعة فوق البنفسجية، وتشير هذه

الملاحظة إلى أن بكتيريا الجلد المتعايشة لديها القدرة على المساعدة في الدفاع عن المضيف ضد أورام الجلد (Nakatsuji et. al. 2018).

إضافة إلى علاقة التعاون (Synergism) Protocooperation وهو نوع من التفاعل يستفيد منه الكائنان مع أن الارتباط ليس إلزاميًّا، ويمكن لكلا النوعين العيش بمفرده، ومع ذلك يوفر هذا الارتباط منفعة متبادلة للشركاء المتفاعلين، وبشكل عام عادة ما يكون من الصعب تحديد ما إذا كانت العلاقة يمكن أن تكون مفيدة لكل من الكائن المتفاعل (التبادلي)، أو التآزر، أو التعايش. وتتضمن بعض أمثلة التفاعل التآزري ما يلي:

- تكوين منتج، حيث لا يمكن لأي من الشريكين العمل بمفرده: على سبيل المثال إكمال المسار (التركيب).

- تقارب الكائنات الحية الدقيقة مع بعضها كما يتضح في الوجود المعتاد للبكتيريا على الأسطح الطحلبية المتعلقة بالعلاقات الكيميائية فيما بينها.

- قدرة بعض الكائنات الحية الدقيقة على استخدام المنتجات النهائية السامة لعملية التمثيل الغذائي.

- إنتاج الأنزيمات المحللة، مثل تلك التي تنتجها بكتيريا Arthrobacter وكذلك Streptomyces الموجودة في التربة، التي تعمل معًا على مبيدات الآفات الفوسفاتية العضوية، وتحلل diazinon، وهذا المنتج يدخل في تحلل المواد الحيوية الغريبة أو المركبات الضارة (Schink, 2002).

بينما في علاقة التعايش Commensalism، يستفيد كائن حي متفاعل من الارتباط، بينما يظل الشريك الآخر غير متأثر، في حين أن هذا قد يحدث في البيئة الطبيعية، فإنه يحدث بالقدر نفسه في عدد من عمليات التخمير التي تشمل الأطعمة عن طريق التفاعلات الغذائية، وعلى وجه التحديد، في الجبن السويسري تستفيد بكتيريا حمض البروبيونيك من حمض اللاكتيك الذي تنتجه بكتيريا *Lactobacillus sanfranciscensis* والذي يعمل بوصفه بادئة، وبالمثل في الجبن ناضج السطح، تتم عمليات أيضية لحمض اللاكتيك بواسطة الخمائر *Debaryomyces hansenii*، والخمائر الخيطية *Geotrichum candidum*، يتم بعد ذلك نزع حموضة سطح الجبن، ويسمح بالنمو المفرط للبكتيريا الهوائية مثل أنواع بكتيريا Arthrobacter، والبكتيريا Brevibacterium، وبكتيريا *Corynebacterium ammoniagenes*، وبكتيريا Staphylococci، وهنا يُعتقَد أن البكتيريا الهوائية تستفيد من هذه العلاقة؛ ومع ذلك تظل الخمائر *D. hansenii* و *G. candidum* غير متأثرين. ومع ذلك، قد لا يكون من السهل تأكيد ما إذا كان هناك أي تأثير طالما أن المعلومات المتعلقة بقياس النمو والبقاء غير متوافرة.

ومن جهة أخرى هناك أنواع من العلاقات السلبية في النظام البيئي تحدث بين الكائنات الحية مثل الافتراس Predation، فالكائنات الحية مترابطة، وتشارك في كثير من الأنماط التفاعلية فيما بينها،

وكذلك مع بيئتها المباشرة؛ فمثل هذه العلاقات مهمة للكائنات كي تنمو بشكل مؤقت، فبمجرد حدوث أي اضطراب من مجموعة واحدة من الكائنات الحية داخل نظام بيئي محدد، فإن هناك إمكانية للتأثير اللاحق في وجود الأنواع وأعدادها في النظام البيئي بأكمله. ويُلاحَظ هذا بشكل أكثر وضوحًا من خلال العلاقات بين الفريسة والمفترس، حيث يتغذى المفترس (predator) على فريسته (prey) ويتسبب في تناقص أعدادها، والمثال النموذجي لهذا السيناريو في عالم الأحياء الدقيقة هو ذلك الذي يحدث بين بكتيريا Vampirococcus المفترسة وبين فريستها بكتيريا Bdellovibrio، ففي مثل هذا التفاعل الفريد تقوم الأنواع من بكتيريا Vampirococcus خلال هذه العلاقة بمطاردة البكتيريا الأخرى وافتراسها، وتستمر Vampirococcus في استخدام الانشطار الثنائي للنمو والتغذية على فريستها وأغشيتها البروتينية وأحماضها النووية حتى تخرج في النهاية من فريستها بكتيريا Bdellovibrio التي تظل بعد ذلك مجرد قشرة فارغة (أي جدار الخلية والغشاء السيتوبلازمي وبعض العضيات داخل السيتوبلازم، ومن المحتمل أن توفر آلية المفترس أساسًا للتحكم في الأنواع الميكروبية الضارة وتعزيز الأنواع المفيدة.

بينما في علاقة التطفل Parasitism، يستفيد كائن حي على حساب كائن حي آخر مشارك، ويحدث له ضرر، وآكلات البكتيريا البكتيريوفيجات Bacteriophages هي الأمثلة المعروفة للتطفل بين الكائنات الحية الدقيقة في الطبيعة، وقد أشارت الدراسات إلى أن الفاجات Phages منتشرة في تخمير الطعام، على سبيل المثال تلك التي تستخدم في المعدات نفسها بشكل متكرر، فهناك احتمال فشل وفقدان الإنتاج في عمليات التخمير الصناعية بسبب هجوم الفاجات من خلال تعطيل السلالات السائدة في مزارع التخمير (Sturino and Klaenhammer 2006)، وأظهرت مؤخرًا زيادة ملحوظة في فهم بيولوجيا الفاجات والارتباطات التفاعلية اللاحقة مع الكائنات الحية التي تؤويها، وتمت دراسة فاجات LAB مثل L. lactis وكذلك *Streptococcus thermophilus* على نطاق واسع بيولوجيًّا (Brüssow 2001 Sturino and Klaenhammer 2006)، وكانت نتائج مثل هذه الدراسات في تسلسل الجينوم رائعة كما يتضح من سبع فاجات phages على الأقل خاصة ببكتيريا *S. thermophilus* التي تم تعيينها مسبقًا بنجاح.

أما التضاد Amensalism فهو نوع من العلاقة بين الأنواع، حيث يكون لأحد الكائنات الحية تأثير سلبي على نظيره الذي يظل غير متأثر بنفسه (Sieuwerts et. al. 2008)، ويحدث هذا بشكل شائع في أثناء تخمير الطعام Food fermentation لأن المنتجات الرئيسة لعملية التمثيل الغذائي الأولية مثل الكحول والكربوكسيلات هي مثبطات نمو قوية Inhibitors للكائنات الحية الدقيقة التي عادة ما تؤدي إلى تلف الطعام، وتم الكشف عن مثال نموذجي لمثل هذا التفاعل في أثناء أيض LAB الذي تم تحسينه لتعزيز الإنتاج السريع للحمض بدلًا من النمو بشكل فعال (Teusink et. al. 2007)، ومثال آخر هو إنتاج مركبات مبيدة للجراثيم مثل البكتريوسينات Bacteriocins التي يتم تصنيعها بواسطة كثير من LAB المخمرة للأغذية، وهي مفيدة في ديناميكية المجموعات

للمزارع المختلطة، في الظروف العادية، تؤدي السلالات المنتجة للبكتيريا إلى تقوية جهاز المناعة، وتمنح العائل الحماية ضد أي آثار ضارة، وتُعدّ مجموعة فريدة من البكتريوسينات (المضادات الحيوية) المشتقة من LAB والكثير من البكتيريا الأخرى الموجبة لصبغة جرام، مهمة بشكل خاص، فعلى سبيل المثال Nisin هو مضاد حيوي أيضي شائع يتم تصنيعه بواسطة *Lactococcus lactis* ويُستخدَم على نطاق واسع في حفظ الطعام، وأساس نشاط هذه المضادات الحيوية هو النفاذية المعززة للغشاء السيتوبلازمي الذي ينتج عنه إزالة الاستقطاب (Hyde et al. 2006)، وتشمل البكتريوسينات القوية الأخرى بلانتاريسين plantaricin وبديوسين pediocin، التي يتم توزيعها على نطاق واسع بين بكتيريا *L. plantarum* وبكتيريا Pediococci على التوالي، وتم استغلال البكتريوسينات واسعة الطيف لمنع النمو المفرط للكائنات الحية الدقيقة المسؤولة عن التلوث والإمراض (Allende et. al. 2007).

وفي نوع المنافسة Competition في التفاعل بين الكائنات الحية الدقيقة، الذي يحدث عادةً في أثناء التخمير، هناك منافسة على مصادر الطاقة والمغذيات بين الكائنات الحية الدقيقة المتفاعلة (Sieuwerts et. al. 2008)، ويحدث هذا غالبًا في البيئات ذات التركيزات العالية من الكربون، ويتفوق أحد الكائنات الحية المتفاعلة على الآخر الذي يمتص العناصر الغذائية بسرعة، ويحولها إلى كتلة حيوية. فعلى سبيل المثال، غالبًا ما يكون النيتروجين مقيدًا في تخمير منتجات الألبان والمنافسة على الأحماض الأمينية المتوافرة بسهولة والببتيدات الصغيرة الموجودة في الحليب تحدث في البداية بين الكائنات الحية نفسها، وفي مراحل التخمير اللاحقة، يتنافس الشركاء المتفاعلون على الببتيدات التي يطلقها عمل الأنزيم المحلل للبروتين، وتقوم الكائنات الحية الدقيقة بعد ذلك بتجميع أنزيم البروتييز proteases وأنظمة النقل والببتيدات، وفي عمليات تخمير الألبان المختلطة، تحدد القدرة على الاستفادة من الأحماض الأمينية بكفاءة معدل النمو والطبيعة الديناميكية للمجموعات (Juillard et. al. 1995, 1996).

التفاعلات الفريدة للأحياء الدقيقة
Unique Microbial Interactions

تفاعلات البكتيريا والفطريات Bacteria-Fungi Interactions توفر الأشكال المختلفة للتفاعلات عبر الكائنات الحية الدقيقة المسببة للأمراض الأساس لمعظم الحالات الطبية، خاصةً إذا كانت تؤثر في الأفراد الذين يعانون من نقص المناعة؛ لذلك من الأهمية بمكان ضمان فهم شامل لآلية التعلق والإشارات التي تحدث في أثناء تفاعلات الفطريات والبكتيريا، وسيؤدي هذا في النهاية إلى إرساء الأساس للتطورات الأخرى في الإستراتيجيات العلاجية لعرقلة إمكانية العدوى الميكروبية وحدوث الأمراض التي تسببها العدوى متعددة الميكروبات، وغالبًا ما توجد البكتيريا والفطريات معًا في أنظمة بيئية مختلفة خاصة في الأغشية الحيوية، حيث تظل متصلة بأسطح صلبة، وتتفاعل من خلال عمليات تأثير مختلفة، وعلى الرغم من المدة الزمنية لتعايشهم، فإن البحث القائم على استكشاف

العلاقات البينية بين البكتيريا والفطريات، خاصة في سياق العدوى المتعددة، لا يزال ضئيلًا. ومع ذلك، فإن أوصاف كثير من العلاقات التفاعلية واسعة النطاق بين الفطريات المسببة للأمراض مثل فطر خميرة *Candida albicans* ومسببات الأمراض البكتيرية المختلفة تتزايد بشكل روتيني، ويُعدّ التجميع والارتباط اللاحق لـخميرة C. albicans بالميكروبات في تجويف الفم وهو أمر مهم في تسكين تجويف الفم مثالًا شائعًا للتفاعلات المتبادلة المفيدة، وعلى العكس من ذلك، فإن التفاعل بين خميرة C. albicans وبكتيريا *Pseudomonas aeruginosa* يوضح كلًّا من العلاقات التنافسية والعدائية، والتفاعل بين *Staphylococcus aureus* و *C. albicans* هو مثال آخر على التفاعل المثير للاهتمام الذي يحدث على أنه ذو طبيعة تآزرية، ولكنه غير مميز بالكامل (Shirtliff et. al. 2009).

وفي الوقت الحاضر، هناك القليل من المعلومات المتاحة حول الأنواع المختلفة من التفاعلات بين الكائنات الحية المختلفة التي تغزو البشر على الرغم من تأثيرها فيهم. ومع ذلك، يجب النظر في هذا المجال بحذر بسبب الطبيعة المعقدة لنوع مختلط من العدوى، ويُعدّ الفهم الواضح لعدوى الأنواع المختلطة (على سبيل المثال، عدوى البكتيريا والفطريات) في البشر أمرًا حاسمًا أيضًا؛ لأن عواقب مثل هذه العدوى يمكن أن تختلف عن تلك التي تسببها الأنواع الفردية (Peleg et. al. 2010). نتيجة لذلك، يصبح تطبيق طرق العلاج البديلة أكثر حاجة، وغالبًا ما تكون مسببات الأمراض الانتهازية بشكل طبيعي جزءًا من عدوى الأنواع المتعددة، ومن ثم، فإن الأشخاص الذين يعانون من نقص المناعة أكثر عرضة لمثل هذه العدوى، ويمثل فطر عفن الخبز *Rhizopus oryzae* نحو من 60-80% من حالات الإصابة البشرية بالفطر المخاطي mucormycosis المسبب لداء الفطريات، وهو عدوى فطرية خطيرة قاتلة يتم تشخيصها بشكل غير منتظم

(Ibrahim et. al. 2008). وبالنظر إلى حقيقة أن فطر Rhizopus وُجِد مرتبطًا بالبكتيريا المنتجة للسموم (التعايش الداخلي)، يبدو على الأرجح أن R. oryzae قد يكون أيضًا ملاذًا للتعايش الداخلي، وتم تحديد الفطريات المرتبطة بالبكتيريا والفطريات الخالية من البكتيريا في الفحص المخبري للعزلات، وتم التحقيق في تأثير البكتيريا التكافلية الداخلية في نتائج العدوى باستخدام نماذج الذباب والفأر التي لم تظهر أي تمييز واضح في الإصابات بين الفطريات التي تؤوي المتعايشات البكتيرية والفطريات التي لا تحتوي على بكتيريا على الرغم من حقيقة أن البكتيريا الداخلية التي أدت إلى ظهور rhizoxin ذات السمية الخلوية (Ibrahim et. al. 2008).

علاقة فطر Rhizopus sp. والبكتيريا الممرضة للإنسان *Burkholderia sp*. يجسد النوع المحايد من التفاعل في أثناء الإصابة، ومع ذلك لا يزال يتعين استكشافها في البشر لمعرفة ما إذا كان لا يزال من الممكن إثبات السلوك نفسه أم لا، وتم إجراء عدد من الاكتشافات والأوصاف المتعلقة بالتفاعلات التآزرية بين مسببات الأمراض البشرية الفطرية والبكتيرية، وتُعدّ الخميرة

Cryptococcus neoformans والبكتيريا *Klebsiella aerogenes* واحدة من أكثر التفاعلات التي تمت دراستها، وتم العثور على عامل ضراوة *C. neoformans* ليكون الميلانين.

ويعتمد *C. neoformans* على ركيزة خارجية؛ لأن الخميرة غير قادرة على تصنيع الميلانين بمفردها، ويتم تحقيق الميلنة بواسطة *C. neoformans* عندما تزود *K. aerogenes* الدوبامين، ويمنح هذا التصبغ الحماية للكائنات الحية الدقيقة ضد كل من الإجهاد البيئي والدفاع المناعي للإنسان (Frases et. al. 2006)، والمحسن الآخر للضراوة الفطرية نتيجة الارتباط بين الأنواع هو تكوين الأغشية الحيوية بواسطة خميرة *Candida albicans*، والبكتيريا *Streptococcus gordonii* التي تتعايش في تجويف الفم، وقد ثبت أن S. gordonii لتعزيز نمو hypha وتشكيل الأغشية الحيوية للخميرة *C. albicans* في دراسة أجراها Bamford et. al. 2009 كشف أن هذا التفاعل يحدث من خلال إشارات فيزيائية وكيميائية، ويحدث التفاعل المادي عن طريق الالتزام، بينما جزيء الإشارة بين الأنواع، المحرض الذاتي-2 (autoinducer-2) يؤدي دور إشارة كيميائية، إضافة إلى ذلك، تشارك *C. albicans* في التفاعلات العدائية بين البكتيريا والفطريات.

وفي أثناء التفاعل في المختبر بين خميرة الكانديدا *C. albicans* وبكتيريا السيدومونس *P. aeruginosa*، يتم تثبيط خيوط الهيفاء في C. albicans (Frey-Klett et. al. 2011). ويحدث النشاط المثبط بسبب جزيء استشعار النصاب البكتيري Bacterial Quorum Sensing Activity، 3-oxo-C12 homoserine lactone. وبالمثل فإن البكتيريا الأخرى مثل Xanthomonas campestris، وبكتيريا *Burkholderia cenocepacia*، وبكتيريا *Streptococcus mutans* تؤدي إلى إنتاج مشتقات farnesol التي تثبط نمو hypha من *C. albicans*.

ويُعتقد أن التأثير المتبادل لـ farnesol و 3-oxo-C12 homoserine lactone يرجع إلى سلسلة مكونة من 12 كربونًا موجودة داخل هياكلها الكيميائية، والسبب في ذلك هو أن الجزيئات الأخرى تحمل تركيبة كيميائية مماثلة مع أطوال سلسلة كربون مختلفة لا تسبب تأثيرات إشارات مماثلة (Hogan et. al. 2004)، وفي معظم الأشكال الشائعة لتفاعلات كل من الفطريات والبكتيريا Fungi-Bacteria Interactions (FBIs) ثبت أن الببتيدوجليكان البكتيري Peptidoglycans يعزز نمو الخميرة C. albicans بدلًا من تثبيطها، وفي وجود farnesol المشتق من C. albicans، فإن نشاط استشعار النصاب البكتيري Bacterial Quorum Sensing Activity يعدل التعبير عن الجينات الفيروسية في بكتيريا (P. aeruginosa Morales et. al. 2010)، ويعد التأثير المتبادل لـ 3-oxo-C12 homoserine lactone وfarnesol ظاهرة طبيعية لتفاعلات الفطريات والبكتيريا توفر أساسًا للتطبيقات المتقدمة في الطب الحيوي وإمكانية إنتاج

منتجات جديدة، ويمكن أن تؤدي الأبحاث المستقبلية التي تهدف إلى تحسين توليف المنتجات الجديدة، بناءً على هذا النوع من تفاعل الفطريات والبكتيريا إلى اكتشافات جديدة.

وتم الكشف عن نتيجة العدوى بين الأنواع التي تتراوح من تعزيز الضراوة إلى العداء التفاعلي من خلال التحليلات والدراسات في تفاعلات البكتيريا والفطريات المختلفة التي تحدث في البشر، ومع ذلك، قد تكون هناك حاجة إلى المزيد من البحث حول التفاعلات العدائية الجزيئية، ومن ثم قد توفر طرق علاج جديدة أو نقاطًا لأهداف غير معروفة سابقًا.

ومن الجدير بالذكر أنه تبين حاليًّا وجود علاقة عدائية بين خميرة *Candida albicans* وبكتيريا *P. aeruginosa*، وغالبًا ما تم عزل هذين الكائنين الممرضين من ضحايا الحروق ومرضى التليف الكيسي، حيث ينتج عن نمو ونشاط بكتيريا P. aeruginosa كثير من الأنشطة الأيضية، على سبيل المثال البيوسيانين pyocyanin (الفينازين phenazine مع أنشطة مضادة للفطريات)، التي تقتل أو تمنع خميرة *C. albicans*، ووجد أن حمض 5-ميثيل-فينازين-1-كربوكسيليك 5-methyl-phenazine-1-carboxylic acid (5MPCA)، سلائف البيوسيانين، يتمتع بفاعلية كيميائية عالية على منتجه النهائي.

وتم اقتراح آلية النشاط المضاد للفطريات لـلمركب MPCA5 التي توضح أن MPCA5 النشط للاختزال يصنع أنواعًا مختلفة من الأوكسجين التفاعلي مثل H_2O_2وO_2، إضافة إلى ذلك، يتفاعل 5MPCA مع شقوق الأمين داخل البروتينات، ويؤدي إلى ضعف الهياكل الخلوية الحيوية والأنزيمات، وتحافظ مشتقات 5MPCA التي تم ربطها تساهميًّا على نشاط الأكسدة والاختزال إضافة إلى قدرتها على إنتاج الأوكسجين التفاعلي، ويؤدي هذان النشاطان إلى الموت النهائي للخلايا الفطرية (Morales et. al. 2010).

تنظيم تفاعلات الأحياء الدقيقة
Regulation of Microbial Interactions

تركيزات الأملاح

لا شك في أن الاختلاف في تركيزات الأملاح له دور في التلف الذي تتعرض له الكائنات الحية الدقيقة، فقد وُجد أن تركيز الملح له تأثير معنوي في تلف البكتيريا وموتها، ونمت الخميرة التي شكلت الحبيبات، بتركيزات منخفضة من الملح، وأدت الخميرة نفسها إلى وجود حبيبات على سطح السائل؛ لأنها وفرت بيئة هوائية لنمو البكتيريا القشرية، واستخدمت هذه البكتيريا الأحماض الأمينية في عملية التمثيل الغذائي وتوليف منتجات التخمير مثل الأسيتات Acetate واللاكتات Lactate، ما أدى إلى زيادة الرقم الهيدروجيني الذي أدى في النهاية إلى تلف البكتيريا، وتم عرض نمط نمو مشابه من قِبل بكتيريا هوائية بتركيز منخفض من الملح (Röling et. al. 1994b)، وتشير هذه

النتائج إلى أن التفاعل بين تركيز الملح ودرجة الحرارة يؤثران بشكل كبيرفي معدل نمو البكتيريا، ويوفر هذا قاعدة محتملة لنمذجة المجتمع الميكروبي لتسخير نتائج مفيدة محددة من حيث المستقلبات والعناصر الأساسية الأخرى، ويمكن بسهولة نمذجة البيئة التي تتفاعل فيها الكائنات الحية الدقيقة عن طريق تغيير العوامل الفيزيائية مثل درجة الحرارة ودرجة الحموضة لجعلها مواتية للنتائج المطلوبة.

درجة الحرارة

التغير في درجة الحرارة يغير أنشطة الأنزيمات الميكروبية، حيث تؤدي درجة الحرارة دورًا مهمًّا في التأثير في أنشطة تفاعل الأنزيمات الميكروبية، وتم إثباته في محتوى النيتروجين في الفورمالديهايد ونمو الكائنات الحية الدقيقة في إنتاج صلصة الصويا اليابانية، حيث كان يُعدّ عاملًا مهمًّا. Röling et. al. 1994b. واقترح أن الاختلاف في درجة الحرارة من 21 درجة إلى 42 درجة مئوية في أثناء التخمير التقليدي يؤثر في إنتاج صلصة الصويا الحلوة، ونتيجة لذلك أشارت النتائج إلى أن ارتفاع درجة الحرارة عزز نمو البكتيريا، ويبدو أن درجة الحرارة لها تأثير ضئيل في التركيز النهائي لمنتجات التخمير، فعلى سبيل المثال، كان تركيز اللاكتات أقل على ما يبدو عند 37 درجة مئوية مقارنة بـ 24 درجة و30 درجة مئوية، ومع ذلك، كان تركيز الإيثانول أعلى إلى حد ما، وكان أعلى تركيز للأسيتات ثابتًا تقريبًا، ومع ذلك انخفض التركيز بشكل طفيف عند كل من 30 درجة و37 درجة مئوية بعد 14 يومًا نتيجة لنمو تشكيل الحبيبات لخميرة *Zygosaccharomyces rouxii*، وفي baceman المحفوظة عند 24 درجة مئوية، شكلت الخميرة المكونة للحبيبات جزءًا صغيرًا من مجموعة الخميرة بأكملها، ولم يكن هناك تغيير في تركيز الأسيتات (Röling et. al. 1994b).

ومن ناحية أخرى، يبدو أن أعداد بكتيريا *Piscibacillus halophilus* تؤدي دورًا مهمًّا في هذه العملية، حيث لوحظ أن معدل نمو P. halophilus يزداد عند درجات الحرارة المرتفعة، وأعلى عدد من أفراد بكتيريا P. Halophilus عند 37 درجة مئوية وصل إلى أدنى مستوى له عند 2.9 107 CFU/mL، ومع ذلك، كان مشابهًا للتخمير المعد تقليديًّا، حيث انخفضت الأرقام بسرعة بعد تحمض baceman. عند 24 درجة مئوية و30 درجة مئوية تم الوصول إلى أعلى عدد من أفراد بكتيريا P. halophilus حيث بلغ 5.0 108 CFU/mL و3.5 CFU/mL108 على التوالي، بالمقارنة مع تلك التي كانت عند 37 درجة مئوية والكنترول التقليدية (Röling et. al. 1994b).

الأوكسجين

يرتبط تركيز الأوكسجين المذاب ارتباطًا مباشرًا بنمو الكائنات الحية الدقيقة، فالأوكسجين عنصر أساسي لنمو الخلايا الميكروبية الهوائية، فعلى سبيل المثال، يتوقف إنتاج السليلوز بواسطة *Gluconacetobacter xylinum* عندما يتلاشى الأوكسجين المذاب في وسط النمو، وعند درجة

حموضة أعلى في حدود 5.4-6.0 أظهر توافر الأوكسجين المذاب في الكنترول المحضر حديثًا وتركيز الملح العالي، نمو بكتيريا *coryneform*، وأدى نمو بكتيريا coryneform إلى استنفاد الأوكسجين في كنترول baceman، ما أدى لاحقًا إلى إعاقة تقدم نموها، وأدى اختفاء الأوكسجين المقترن بارتفاع درجة الحموضة بسبب عدم قدرة بكتيريا كورنيفورم coryneform على إنتاج الحمض، إلى نمو بكتيريا *P. halophiles* المتحملة للملوحة (Röling et. al. 1994b)، وانخفض الرقم الهيدروجيني للأسيتات حيث يرتبط نموه بإنتاج اللاكتات، وهذا يضمن توافر الأوكسجين المذاب ليكون عاملًا حيويًّا في أثناء تفاعل الكائنات الحية الدقيقة داخل المجتمع.

درجة الحموضة pH

تُعدّ درجة الحموضة من العوامل المحددة لنمو الكائنات الحية الدقيقة، حيث يؤدي الأس الهيدروجيني pH دورًا أساسيًّا في قدرة الكائنات الحية الدقيقة على البقاء في مجموعة واسعة من الأوساط البيئية، وتم تأكيد هذا الاستنتاج من خلال عدد من الدراسات، التي كشفت أن الاختلاف في الرقم الهيدروجيني حدث في أثناء مرحلة تخمير الحليب بسبب زيادة تركيز حمض اللاكتيك الذي لم يكن كافيًا للقضاء على نمو أي من بكتيريا الليستيريا Listeria الممرضة للإنسان أو Staphylococcus أو تثبيطهما، والأهم من ذلك أنه من المحتمل أن تؤثر قيم الأس الهيدروجيني في بقاء هذه العوامل الممرضة، ومع ذلك، فإن هذه التغييرات تحدث في وقت متأخر جدًّا في أثناء تخمير الحليب، إذا حدث ذلك على الإطلاق، ومن غير المحتمل أن تتحقق في أثناء التصنيع العادي للمنتج المخمر، ومن المحتمل أن الاختلاف في إنتاج الأس الهيدروجيني وحمض اللاكتيك بمرور الوقت بالتزامن مع مراحل المعالجة الأخرى قد يعملان معًا بوصفهما نقاط تحكم حرجة (Röling et. al. 1994b).

العناصر الغذائية

تتطلب الكائنات الحية الدقيقة مغذيات محددة للنمو والتطور، فالعناصر الغذائية المحددة مطلوبة لنمو الكائنات الحية الدقيقة المختلفة لأداء أنشطة التمثيل الغذائي المختلفة، وتختلف كمية ونوع العناصر الغذائية المحددة بشكل كبير، وتعتمد بشكل أساسي على نوع الكائن الدقيق نفسه، ومصادر الطاقة والنيتروجين والمعادن والفيتامينات والمياه هي أمثلة على العناصر الغذائية الأساسية التي تتطلبها الكائنات الحية الدقيقة، وهذه العناصر الغذائية متوافرة في الأطعمة بكميات مختلفة، فعلى سبيل المثال، اللحوم غنية بالبروتينات، والمعادن، والدهون، والفيتامينات، بينما تحتوي الأطعمة العضلية على كميات أقل نسبيًّا من الكربوهيدرات، ومن ثم، فإن هذه الأطعمة توفر بيئة مناسبة للتفاعل الميكروبي، وبشكل عام، تحتوي الأطعمة ذات الأصل النباتي على تركيزات أعلى من مجموعات الكربوهيدرات المختلفة وكميات مختلفة من البروتين والمعادن والفيتامينات، ويتم استخدام العناصر الغذائية بما في ذلك الكربوهيدرات والكحوليات والأحماض الأمينية وما إلى ذلك من قِبل الكائنات

الحية الدقيقة الموجودة في الطعام بوصفها مصادر للطاقة والتمثيل الغذائي، وتميل معظم الكائنات الحية الدقيقة إلى استخدام السكريات البسيطة مثل الجلوكوز في عملية التمثيل الغذائي، ومن ناحية أخرى، فإن الكائنات الحية الدقيقة الأخرى قادرة على أيض الكربوهيدرات الأكثر تعقيدًا مثل النشا أو الأطعمة السليلوزية من أصل نباتي، أو الجليكوجين في الأطعمة المرتبطة بالعضلات، ولا تزال بعض الميكروبات تستمد طاقتها من الدهون والأحماض الأمينية بوصفها مصادر للنيتروجين، وتشمل الأمثلة الأخرى للمعادن الضرورية لنمو الكائنات الحية الدقيقة الحديد، والكبريت، والمغنيسيوم، والمنجنيز، والفسفور، والكالسيوم، والبوتاسيوم، وعادة ما تظهر البكتيريا موجبة الجرام سلوكًا صعبًا فيما يتعلق بمتطلباتها الغذائية، ومن ثم، فهي غير قادرة على توليد بعض العناصر الغذائية اللازمة للنمو، فعلى سبيل المثال، البكتيريا الموجبة لصبغة جرام *Staphylococcus aureus* العنقودية الذهبية الممرضة التي تنتقل عن طريق الغذاء تستخدم الأحماض الأمينية، والثيامين، وحمض النيكوتين لتطويرها (Jay 2000). على العكس من ذلك، تمتلك البكتيريا سالبة لصبغة جرام القدرة على توليد وتلبية أهم العناصر الغذائية الضرورية للبقاء على قيد الحياة من الكربوهيدرات والبروتينات والدهون والمعادن والفيتامينات المتوافرة في مجموعة واسعة من الأطعمة، والسالمونيلا الملهبة هي واحدة من مسببات الأمراض التي لها متطلبات غذائية محددة، ومن المحتمل أن يتأثر نمو بكتيريا السالمونيلا *Salmonella enteritidis* المسببة للتسمم الغذائي سلبًا بكمية الحديد المحدودة، وعلى سبيل المثال، يحتوي عنصر الزلال في البيض على عوامل مضادة للميكروبات مقارنة بصفار البيض، ومن ثم فهو قادر على الحد من توافر الحديد الذي بدوره يمنع فرط نمو *S. enteritidis* إلى مستويات مرتفعة، وقد أوضح Humphrey أنه عند إضافة الحديد إلى اللقاح S. enteritidis في زلال البيض، تحسن نموه بشكل كبير (Humphrey, 1994)، وبشكل عام، تسلسل استخدام العناصر الغذائية من قِبل الكائنات الحية الدقيقة هو أن يتم استخدام الكربوهيدرات والأحماض الأمينية الأولى متبوعة باستخدام مغذيات أكثر تعقيدًا، ودائمًا ما يكون الموطن الغذائي معقدًا؛ لأن خليطًا من كثير من الكائنات الحية الدقيقة يتعايش في نفس الطعام في نفس الوقت، ويحدد توافر العناصر الغذائية معدل نمو هذه الكائنات الحية الدقيقة.

وتوجد علاقة التناسب المباشر بين تركيز المغذيات وعدد الخلايا البكتيرية المرتبطة، بحيث تؤدي الزيادة في متغير واحد إلى زيادة مماثلة في الآخر، ومع ذلك، يتم دعم تطوير الأغشية الحيوية الرقيقة من خلال الحد الأدنى من تركيزات العناصر الغذائية، وتكتسب الأغشية الحيوية العناصر الغذائية عن طريق إعادة تركيز المواد العضوية بكميات دقيقة على الأسطح بواسطة البوليمر خارج الخلية، باستخدام المنتجات النهائية من الكائنات الحية الدقيقة المجاورة والمستعمرات الوسيطة، وعن طريق تجميع مواردها الكيميائية الحيوية باستخدام أنزيمات مختلفة لتفتيت ركائز الطعام؛ ونظرًا لأن مصفوفة الأغشية الحيوية تحتوي عمومًا على شحنة سالبة، فغالبًا ما توجد كثير من العناصر الغذائية (على وجه التحديد الكاتيونات) مرتبطة بسطح الأغشية الحيوية، ويمكن تبادل

العناصر الغذائية سالبة الشحنة مع الأيونات الموجودة على السطح؛ لذلك يتم تزويد الخلايا الفردية داخل الأغشية الحيوية بغذاء كافٍ بدلًا من الماء المتاح خارج الخلية (Cowan et. al. 1991).

التنظيم الجزيئي لتفاعلات الأحياء الدقيقة
Molecular Regulation of Microbial Interaction

أدى تفاعل المستوى الجزيئي بين الكائنات الحية الدقيقة المختلفة إلى مجموعة واسعة من التنوع الكيميائي، وتؤدي المستقلبات الثانوية ذات الوظيفة المحددة في الكائنات الحية الدقيقة دورًا محوريًّا في التوسط في التفاعلات المعقدة للبكتيريا والفطريات في الطبيعة مثل ضمان بقائها في البيئات التنافسية، ومن ثم، تمتلك كثير من الكائنات الحية الدقيقة إمكانات تخليق حيوي كبيرة كما تم اكتشافها سابقًا في كثير من مشاريع تسلسل الجينوم الكامل (Scherlach and Hertweck, 2009; Winter and Behnken, 2011). غالبًا ما تلبي المتطلبات المتغيرة للبيئة المتغيرة التعبير المنظم بإحكام عن مجموعات الجينات التخليقية الحيوية، وغالبًا ما تحتوي المزارع الميكروبية النقية على معظم جينات التخليق الحيوي للمنتجات الطبيعية التي تبدو نائمة، والآثار المترتبة على هذا السيناريو هي أن كثيرًا من النشاطات الأيضية الثانوية تظل غير مستغلة. ومع ذلك، فقد تم استغلال إمكانات تفاعلات البكتيريا والفطريات في توصيل الدواء إلى حد كبير، وقدم هذا بعض المعلومات المحدودة حول التمثيل الغذائي الثانوي في الزراعة المشتركة، بينما تم استخدام أسلوب المزارع متعددة الميكروبات على نطاق واسع من أجل الحصول على إنتاج صناعي ضخم مثل الأطعمة والمشروبات، وأثبتت الأبحاث السابقة إمكانية تأثير التخمير المختلط علىفي إنتاج الأنشطة الأيضية الثانوية، وتم تقييم تأثير الكائن المستنبت الأساسي في أساس نشاط المضاد الحيوي لمستخلص المزرعة أو المحصول المحسن لمركب معين (Pettit, 2009)، وتلقى البحث الذي يكشف عن المنتجات المكتشفة حديثًا المستمدة من مجموعة من المسارات أو التخليق الحيوي أو التنشيط اهتمامًا كبيرًا، وطورت دراسة Cueto et. al زراعة مشتركة لأنواع من فطر Pestalotia البحرية مع بكتيريا بحرية غير معروفة مقاومة للمضادات الحيوية لاستنباط التخليق الحيوي للبنزوفينون بيستالون benzophenone pestalone (Cueto et al. 2001)، وأظهر المركب الناتج، الذي يتم إنتاجه فقط في المزارع المختلطة، فاعلية محسنة ضد البكتيريا تجاه بكتيريا *Staphylococcus aureus* الذهبية المقاومة للميثيسيلين Methicillin والبكتيريا المعوية البرازية المقاومة للفانكومايسين Enterococcus faecium Vancomycin، وتم استزراع الأكتينوميسيتات، *Salinispora arenicola*، في الوسط نفسه مع أنواع Emericella المشتقة من البحر في دراسة مختلفة (Oh et. al. 2007). ونتيجة لذلك، كان هناك إنتاج محسّن بمقدار 100 ضعف من اثنين من الببتيدات الحلقية الجديدة، إميريكيلاميد emericellamide A وB ما أدى إلى توضيح هيكلها، وتم تسجيل نشاط معتدل مضاد للميكروبات للإميريكيلاميد ضد Staphylococcus aureus غير المتفاعل مع الميثيسيلين، وتم استخدام بروتوكول حذف الجينات

لاكتشاف جينات emericellamide التخليقية الحيوية التي تستخدم فطر *Aspergillus nidulans* بوصفه كائنًا حيًّا نموذجيًّا، حيث مهد الطريق لتوليد نظائر مبتكرة (Chiang et. al. 2008). والفطر البحري *Libetella spp*. تمت زراعته في بيئة مشتركة مع بكتيريا بحرية معينة، وتم إنتاج أربعة من المركبات الهيدروجينية ديتيربينويدات diterpenoids تم اكتشافها حديثًا، وليبرتيلينونيس libertellenones A-D (Oh et al., 2005)،وتم استخدام أسلوب أكثر منهجية باستخدام المراقبة القائمة على المصفوفات الدقيقة في دراسات مجموعة التعبير الجيني للتخليق الحيوي المشفر في نموذج فطر A. nidulans بعد الحث من خلال تفاعله مع الفطريات الشعاعية Actinomycetes في نفس الأوساط البيئية (Schroeckh et. al. 2009)، وكشفت النتائج أيضًا عن تعقيد التفاعلات الفطرية للبكتيريا، وأعطت مزيدًا من الأدلة لدعم مزيد من الدراسة للروابط المتقاطعة الميكروبية في ضوء الاكتشافات التي لم يتم إجراؤها بعد على نفس التفاعلات.

الالتصاقات الخلوية للخلية Cell-Cell Adhesions

التصاق الخلية الخلوي هو آلية يحدث من خلالها الارتباط التفاعلي الخلوي الميكروبي، بحيث تصبح الخلايا ملتصقة ببعضها بالأسطح أو الركيزة الأيضية، ويتم التحكم في هذه العملية بواسطة التفاعلات التي تحدث من خلال جزيئات سطح الخلية، وتنتج هذه العملية عن عمل البروتينات السكرية عبر الغشاء والمشار إليه بجزيئات التصاق الخلية مثل سيليكتينز selectins، وإنتجرين integrins، وسانديكانس syndecans، وفي كل من بدائيات النوى وحقيقيات النوى، يكون الاتصال بين الخلية والخلية عبر إشارة جزيئات أصغر يُعدّ أمرًا بالغ الأهمية (Wang et. al. 2004). وفي مملكة بدائيات النوى، تم تحديد مجموعات عدة من إشارات الاتصال الخلوي الخلوي التي تتحكم في العمليات البيولوجية المختلفة بين الخلايا مثل التلألؤ البيولوجي Bioluminescence، ونقل البلازميد، وضراوة الكائن الحي، وتكوين الأغشية الحيوية Chen et. al. 2002))، ويؤدي الاتصال الخلوي الخلوي في البكتيريا دورًا حيويًّا في التنسيق الوظيفي داخل الأفراد من العائلة نفسها في كثير من الأنشطة البيولوجية التي تشمل التعبير عن ترميز الجينات للضراوة وتشكيل الأغشية الحيوية (Wang et. al. 2004).

استشعار النصاب Quorum Sensing

أظهرت كثير من الأنواع البكتيرية القدرة على التحكم في أنشطتها التعاونية وأداء وظائفها الفسيولوجية المتخصصة من خلال آلية استشعار النصاب Quorum Sensing (QS)،وفي مثل هذه الحالة، تتبادل الخلايا البكتيرية المعلومات فيما بينها عن طريق إفراز إشارة الجزيئات الصغيرة القابلة للانتشار واستشعارها والاستجابة لها، وتضيف هذه التفاعلات مزايا كبيرة لنفس الكائنات الحية في استعمار المضيف، وتشكيل الأغشية الحيوية، وتعزيز المنافسة، والتأقلم مع البيئة المتغيرة، والأهم من ذلك، تشارك كثير من الأنشطة التي تسيطر عليها QS في الضراوة والتأثيرات

المسببة للأمراض المحتملة للبكتيريا)، ومن ثم، فإن الفهم الحقيقي للتفاصيل الجزيئية لآلية QS وكذلك أنشطتها الاجتماعية المنسقة قد يوفر اختراقًا في إدارة الالتهابات البكتيرية الناشئة (Li and Tian 2016).

وخلال مرحلة النمو، تنتج البكتيريا إشارات جزيئات وسيطة صغيرة معينة تسمى المحرضات التلقائية التي تشارك في أنظمة QS، وعندما تصل هذه التفاعلات التلقائية إلى عتبة تركيز معينة، فإنها تتفاعل مع منظم النسخ، وتطلق تعبيرًا محددًا لمجموعة من الجينات، وإن لاكتونات N-acyl homoserine lactone (AHL) -هي فئة من جزيئات الإشارة تشارك في استشعار النصاب البكتيري- الذي تنتجه البكتيريا سالبة الجرام هي محرضات ذاتية تمت دراستها بشكل شائع داخل الأنواع، وفي هذه المجموعة من البكتيريا، يتم تنظيم المحددات الجينية لـ QS في شبكة تنظيمية معقدة بما في ذلك سلسلة QS ومجموعة من منظمات النسخ، وما بعد النسخ التي تؤثر في توليف محفز AHL التلقائي (Bouyahya et al., 2017)، ومن المعروف أن أكثر من 70 نوعًا معروفًا من البكتيريا سالبة الجرام تستخدم AHL بوصفه جزيء إشارة، ومن ناحية أخرى، تستخدم البكتيريا موجبة الجرام محفزًا ذاتيًّا مختلفًا يعتمد على قليل الببتيد مع مستشعر مكون من عنصرين، وبصرف النظر عن اللاكتونات، يمكن للبكتيريا سالبة الجرام وموجبة الجرام أيضًا استخدام جزيء إشارة مشترك (Borate furanosyl)، المعروف باسم المحرض الذاتي-2 (IA-2) و(IA-3) (Bouyahya et al., 2017)، وتؤدي QS دورًا مهمًّا في التفاعلات الأولية التي تحدث بين الكائنات الحية الدقيقة التي توفر فرصة لدراسات مكثفة للاستفادة من عمل جزيئات QS للتحكم في التفاعلات الميكروبية واستغلالها في النهاية للتطبيقات الأساسية، ويوفر هذا أيضًا آلية تدخل في مكافحة المشكلة الحالية التي لا يمكن التغلب عليها المتمثلة في مقاومة المضادات الحيوية (Adonizio et. al. 2008)، وتم مؤخرًا مواجهة ظهور وإعادة ظهور الأمراض البكتيرية المعدية من خلال النهج الأكثر فعالية لاستهداف وسطاء آلية استشعار النصاب QS (Hentzer et. al. 2003)، ويتم حاليًّا النظر في الجزيئات الجديدة المضادة لـ QS بوصفها إجراءات بديلة أساسية للتغلب على التحديات الرئيسة التي تقدمها مسببات الأمراض المقاومة للأدوية (المضادات الحيوية). وتحقيقًا لهذه الغاية، تم اقتراح كثير من الإستراتيجيات لمقاطعة و/ أو تعطيل نظام QS البكتيري مثل تثبيط توليد الإشارات، وانتشارها، وتثبيط استقبال الإشارة (Bouyahya et al., 2017).

ويُعدّ اكتشاف الاستخدام المكثف لأنظمة QS في البكتيريا أمرًا بالغ الأهمية في توفير المعلومات المهمة من قِبل الباحثين حول دراسات السلوك البكتيرية متعددة الخلايا بدلًا من التركيز على العمليات البيولوجية للخلية المفردة، ومع ذلك، لا تزال الدراسات حول كيفية أداء QS دورًا ميكانيكيًّا في تكوين الأغشية الحيوية في البكتيريا في مراحل تطورها الأولى، ولا يزال تحديد العوامل الدقيقة التي تؤثر في تكوين الأغشية الحيوية وتحفيز QS ونقل الجينات اللاحق يمثل تحديًا كبيرًا في هذا المجال، وفي الأغشية الحيوية متعددة الأنواع، يصبح تحديد النتائج الوظيفية لـ QS

تحديًا بالقدر نفسه، ويُعدّ هذا المجال أولوية رئيسة للبحث، حيث يمكن أن يعالج أي تحديات بارزة في مجال السلوكات الاجتماعية البكتيرية المتطورة حديثًا، ومما لا شك فيه، أن مواجهة التحديات المذكورة ستسهم بشكل إيجابي في أحدث التقنيات المتعلقة بالسلوك الميكروبي (Li and Tian 2016).

تخليق وتركيب وتكوين الغشاء الحيوي Biofilm

بمرور الوقت، أثبتت الكائنات الحية الدقيقة أنه بدلًا من الوجود بوصفها خلايا فردية حية حرة، تظهر هذه الكائنات أيضًا مرتبطة بالأسطح أو الهياكل أو اتحادات تعاونية يشار إليها باسم الأغشية الحيوية (Harriott and Noverr, 2011)، وفي هذه الحالة، تكون مقاومة؛ لأنها تستخدم هذه الظاهرة لتعزيز فرصها في ظل الظروف البيئية التمكينية.

ويحدث تكوين الأغشية الحيوية Biofilm بطريقة متسلسلة، حيث تتضمن الخطوة الأولية إما جزيئات عضوية أو غير عضوية تمتص على السطح، وتُوجِد طبقة تكييف، وفي معظم الحالات، ينتج عن الحليب أو البروتينات المشتقة من اللحوم منتجات تُعدّ مكونات أساسية لهذه الطبقة الأولية؛ لأنها تساعد على الالتصاق البكتيري، وعلى سبيل المثال، يزيد بروتين مصل اللبن من الحليب بشكل تفضيلي من التصاق كثير من الكائنات الحية الدقيقة المرتبطة بالحليب، إضافة إلى زيادة التصاق البكتيريا بشكل عام (Kumar and Anand 1998)، ويحدث بدء نمو الرقاقة الحيوية البكتيرية بشكل عام عندما تلتصق الخلايا الفردية في البداية بسطح، وتتأثر هذه العملية بشكل كبير بالمغذيات التي تزيد من قدرة الخلايا البكتيرية على الالتصاق بالسطح (Watnick and Kolter 2000). والمرحلة التالية في تطوير الأغشية الحيوية هي ارتباط الكائنات الحية بطبقة التكييف، ويتم التحكم في هذا الالتصاق البكتيري من خلال عوامل عدة، مثل درجة الحموضة pH، ودرجة حرارة بيئة التلامس، ومعدل تدفق السوائل على سطح التلامس، وتوافر المغذيات، ومدة ملامسة سطح البكتيريا، ومرحلة النمو البكتيري، ومدى كره السطح للماء (Kumar and Anand 1998). وتسهل زيادة حالة كراهية السطح للماء من التصاق البكتيريا بالسطح؛ على سبيل المثال، الفولاذ المقاوم للصدأ هو سطح ذو مقاومة عالية للماء قادر على تفضيل الالتصاق لتشكيل الأغشية الحيوية، وتمتلك جراثيم البكتيريا Bacillus العصوية سطحًا كارهًا للماء بسبب بروتيناتها الخارجية، ومن ثم تعزز قدرة الالتصاق على الأسطح الكارهة للماء مقارنة بالخلايا الإنجابية القابلة للحياة، ومن ثم، فإن الأبواغ تلتصق بالفولاذ المقاوم للصدأ بمستويات أعلى من الخلايا التناسلية القابلة للحياة (Deibel and Schoeni، 2003).

ومن أمثلة الهياكل التي تعزز الارتباط البكتيري بالأسطح الأخرى: الأهداب fimbriae، والشعيرات pilli، والأسواط flagella، وعديدات التسكر الخارجية exopolysaccharides (EPS) التي تربط البكتيريا بغشاء التكييف (Kumar and Anand 1998)، وتمتلك EPS رابطة

كهروستاتيكية وتساهمية وهيدروجينية ورابطات ثنائية القطب وعلاقة كارهة للماء، وعلى الرغم من أنه عند بدء التفاعل الميكروبي، تكون رابطة EPS- البكتيريا ضعيفة، ويمكن تدميرها بسهولة عن طريق تدفق المياه، إلا أنها تتعزز بمرور الوقت، ويصبح الارتباط لا رجعة فيه، وعندما يصل الغشاء الحيوي Biofilm إلى هذه المرحلة، قد يتطلب انفصال الخلايا والإزالة اللاحقة إجراءً أقوى مثل الحك أو الكشط، ولقد قللت البكتيريا غير العائمة من القدرة على تكوين الأغشية الحيوية؛ لأنها تفتقر إلى الأسواط، وعلى سبيل المثال، في معظم البكتيريا سالبة الجرام، يتم تخصيص نحو 1% من الجينوم لوظيفة الأسواط.

ومن ناحية أخرى، توفر الشعيرات للبكتيريا حركية الوخز من خلال تمديدها (الشعيرات pilli) والتراجع، ويحدث هذا الشكل من الحركة فقط عندما تكون الخلايا ملتصقة بسطح، وتنزلق البكتيريا عبر هذا السطح، ومن ثم، فإن حركة الوخز ضرورية لتركيب كل من المستعمرات الدقيقة ونشر مجتمعات الأغشية الحيوية (Ronney et. al. 2004)، وتتضمن الخطوة الأخرى في تركيب الأغشية الحيوية نمو البكتيريا وتوسعها حتى مرحلة النضج، ويمكن أن يحدث نضج الأغشية الحيوية خلال 24 ساعة، ومع ذلك، يمكن أن يستمر نموها إلى أحجام ملليمترات على مدى أيام عدة، وهذا يمثل التكوين الكامل لوحدة Biofilm بكتيرية. وفي هذه المرحلة، يُعدّ العمل المشترك المتمثل في الغسل الشديد واستخدام المطهرات هو أفضل وسيلة لإزالة الأغشية الحيوية؛ والمطهرات وحدها غير كافية لمثل هذه الإزالة، وفي أوقات زمنية معينة، يحدث انفصال وتقشير بعض الخلايا البكتيرية داخل اتحادات الأغشية الحيوية، وهذا في المقام الأول نتيجة لانخفاض معدل التدفق، وتأثيرات قص السوائل المقترنة بالمواد الكيميائية داخل السائل أو تغيير خصائص بكتيريا الأغشية الحيوية، وغالبًا ما يتم نقل البكتيريا التي تم إطلاقها إلى مواقع جديدة، حيث يتم البدء في تكوين أغشية حيوية جديدة (Kumar and Anand 1998).

توظيف المواد والاحتياجات الأيضية للتفاعل الميكروبي

في بيئة حساسة لدرجة الحرارة، يتم تحديد قدرة نمو الميكروبات لمسببات الأمراض داخل اتحاد الكائنات الحية الدقيقة الأخرى من خلال التفاعل بين العوامل الداخلية والخارجية، إضافة إلى نوع التكنولوجيا المستخدمة في المعالجة، وعلى سبيل المثال، في علم الأحياء الدقيقة للأغذية، تتضمن كثير من الخصائص الأساسية للكائنات الحية الدقيقة التي تؤثر في الأنواع السائدة ومعدل نمو السلالات الميكروبية الفردية والسمات التفاعلية المشتركة بين المجموعات الميكروبية مجتمعة.

ويتم التحكم وراثيًّا في المحددات الرئيسة لطول مدة التأقلم الميكروبي، ووقت التكاثر، والإنتاج الكلي للخلايا، وتراكم المنتجات النهائية لعملية التمثيل الغذائي لديه القدرة على تأخير نمو بعض الأنواع؛ ونظرًا لتعقيد التفاعل بين العوامل البيئية والكائنات الحية الدقيقة، في أي وقت، يؤوي الطعام النباتات الميكروبية الخاصة به، التي ترتبط به باستمرار، ويضمن توافر الكائنات الحية

النشطة الأيضي أن حدوث السيادة في النباتات هي عملية تحدث ديناميكيًّا، ويمكن أن تتخذ هذه التفاعلات إما بطريقة عدائية أو تآزرية اعتمادًا على طبيعتها المعززة أو المثبطة للنمو، تمامًا كما هو الحال في أنظمة الأطعمة، غالبًا ما تتضمن الإجراءات المتعارضة التنافس على العناصر الغذائية، لمواقع الارتباط (الفضاء)، والتغيرات البيئية غير المواتية، والكثير من هذه العوامل (Jay 2000). ويتم ملاحظة سيناريو مماثل عندما تتفاعل الكائنات الحية الدقيقة في المزارع المختلطة داخل البيئة؛ فيعطي لحم البقر النيئ المفروم مثالًا نموذجيًّا على هذا الوضع، حيث يُلاحظ أن السم المعوي للبكتيريا Staphylococcus aureus العنقودية الذهبية غير متوافر تمامًا، ومع ذلك توجد البكتيريا نفسها عادة بنسب محدودة في هذا المنتج الغذائي، والتفسير الأساسي لهذا هو أن رابطة Pseudomonas-Acinetobacter-Moraxella التي تحدث غالبًا في هذا الغذاء تنمو بمعدل مرتفع، بحيث تتفوق على Staphylococci ، وفي حالة العوامل الخارجية، يُعدّ نشاط المضادات الحيوية للغازات في ضغوط البيئة المحيطة وشبه المحيطة على الميكروبات أمرًا ضروريًّا في الأطعمة (Loss and Hotchkiss 2001).

والكائنات الحية الدقيقة تمنع حياة الميكروبات الأخرى بطريقتين: أولًا، يمكن منع نموها وانتشارها من خلال تأثيرها السام المباشر، وبعض الغازات مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) والأوزون (O_3) والأوكسجين (O_2) تسمم بعض الكائنات الحية الدقيقة، والمحددات الرئيسة لهذه الآلية المثبطة هي الخواص الكيميائية والفيزيائية للغاز نفسه وارتباطه بكل من المرحلتين المائية والدهنية للغذاء، والجذور المؤكسدة التي ينتجها الأوزون O_3 والأوكسجين O_2 شديدة السمية للبكتيريا اللاهوائية، واعتمادًا على تركيزها، يمكن أن يكون لها تأثير مثبط في الكائنات الحية التي تعتمد على الأوكسجين في بقائها، ويبدو أن مدى فاعلية ثاني أكسيد الكربون يتم التعبير عنه بشكل أكبر عند الميكروبات ذات المعيشة الهوائية الإجبارية Obligate aerobes وعندما يكون متاحًا بنسب مرتفعة، يكون لديه القدرة على منع نمو الكائنات الحية الدقيقة الأخرى، ويتم تحقيق آلية أخرى للتثبيط من خلال تعديل المحتوى الغازي، الذي يتحقق تأثيره بشكل غير مباشر من خلال تغيير بيئة النمو الميكروبية داخل البيئة، وتتغير البيئة التنافسية عندما يتغير الجو أيضًا، وفي بيئة تكون فيها ظروف النمو غير مواتية لتكاثر خلايا كائن حي واحد، قد تكون الحالة نفسها مفيدة للكائنات الدقيقة الأخرى، ومن ثم تمنحها ميزة غذائية على منافستها. بناءً على البكتيريا الأصلية المسببة للأمراض Native pathogenic microflora وكذلك مادة التفاعل Substrate، قد تؤدي هذه الحالة إلى نتائج مفيدة أو غير مفيدة، ومثال على النشاط الميكروبي غير المباشر هو استبدال النيتروجين بالأوكسجين، وبشكل عام، مع انخفاض درجة الحرارة، تزداد التأثيرات المثبطة لثاني أكسيد الكربون؛ لأن قابلية ذوبان غاز ثاني أكسيد الكربون تزداد في درجات الحرارة المنخفضة (Jay 2000)، وينخفض الرقم الهيدروجيني للطعام عندما يذوب فيه ثاني أكسيد الكربون، وأما بالنسبة إلى النيتروجين، حيث إنه متوافر بكميات دقيقة في الغلاف الجوي، فلا يحمل أي خصائص مضادة للميكروبات تمامًا، ويتم استخدامه بشكل منفصل أو بالاشتراك مع ثاني أكسيد الكربون، ومن ثم

يكون له تأثير مثبط غير مباشر على في الكائنات الحية الدقيقة الهوائية (Loss and Hotchkiss 2001).

الجوانب التطبيقية للتفاعلات الميكروبية
Applications of Microbial Interactions

تتنوع الجوانب التطبيقية للتفاعلات بين الأحياء الدقيقة والأنشطة الحيوية فيما بينها (الشكل 10-2)، وذلك بحسب نوع الكائن الحي ومن يشترك معه بوصفه طرفًا آخر في العلاقة التي تجمعهما، ويمكن إجمال التطبيقات في الجوانب الآتية:

أولًا: التطبيقات الطبية Medical Applications

إن بيانات التفاعلات البكتيرية والفطرية حول الأهمية الطبية محدودة حاليًا، ومع ذلك، فقد قدم عدد من الدراسات وصفًا للعلاقة بين البكتيريا وفطر خميرة *Candida spp*، وفي كثير من العينات الطبية (Klotz et al. 2007). وعلى الرغم من أنه من غير الواضح ما إذا كانت عوامل مثل العلاج المضاد للبكتيريا الجهازية، أو حالة المناعة للمضيف، أو التعرض للعدوى في المستشفيات، تعرض المريض لخطر الاستعمار من قِبل الفطريات والبكتيريا أم لا، على الرغم من أن العدوى عن طريق مزيج من أنواع عدة قد يكون لها تأثيرات مقارنة بتلك العدوى التي يسببها نوع واحد، وفي إحدى الدراسات حيث الالتهاب الرئوي المرتبط بأجهزة التنفس الصناعي (VAP) الناجم عن *Pseudomonas aeruginosa*، تم اقتراح أنه عندما يتم استعمار الجهاز التنفسي بواسطة Candida spp، كان هناك احتمال متبادل متزايد لحدوث عدوى VAP الزائفة (Azoulay et. al. 2006)، وتم دعم هذه الملاحظة أيضًا من خلال دراسات أخرى حيث قام الأفراد الذين يعانون من نمو المستعمرات الفطرية في القصبة الهوائية بواسطة*Candida spp*. (أي أولئك الذين تلقوا العلاج بالعقاقير المضادة للفطريات) كانوا أقل استعدادًا للإصابة بـ VAP الكاذب (Nseir et. al. 2007). وتم التحقق من صحة هذه النتائج بشكل أكبر من خلال البيانات من النماذج الحيوانية، وكشف استخدام عينات بشرية من الماضي أن الوفاة بسبب البكتيريا أو العدوى الفطرية (بواسطة Candida spp). في مجرى الدم تراوحت بين 10 إلى 40% (Gudlaugsson et. al. 2003). ومع ذلك، فقد تم إجراء تحليل مقارن للعدوى من النوع الواحد والأنواع المختلطة من خلال عدد قليل جدًّا من الدراسات حتى الآن، وحددت إحدى هذه الدراسات في عدوى مجرى الدم انخفاض فرص البقاء على قيد الحياة للبكتيريا المختلطة مع Candida spp. من عدوى Candida spp. وحدها (Dyess et al. 1985)، ونتيجة لاحتمال نادر لتجارب بشرية عشوائية مستقبلية، فإن تحليل الآثار المترتبة على عدوى الأنواع المختلطة محدود، وفي هذه الحالة، تكون الدراسات القائمة على الملاحظة أكثر تعقيدًا نظرًا لحقيقة أن المرضى الذين يعانون من عدوى أنواع متعددة يشكلون تهديدًا لعوامل الخطر الأخرى التي تتميز بشكل أكبر بالنتائج السريرية السيئة، وعلى سبيل المثال،

يمكن أن تكون القدرة المتقدمة على تطور المرض أو العلاج فعالة بشكل كافٍ ضد أحد الكائنات الحية المتورطة في العدوى أو كليهما، وعلاوة على ذلك، فإن وصف الآليات التي تحدث بها أي اختلافات في ضراوة الإصابة على المستوى الجزيئي في العدوى الميكروبية المختلطة أمر صعب في دراسات الأمراض البشرية (Jard et al. 2011).

ثانيًا: التطبيقات الغذائية Food Applications

يؤدي التجميع المشترك للميكروبات مثل الفطريات الخيطية والخمائر وبكتيريا

lactic acid (LAB)، دورًا مهمًا في تحضير كثير من المنتجات الغذائية المخمرة (Scherlach et al. 2013)، وتسهم هذه الزراعة المشتركة بشكل كبير في الخصائص الحسية للأغذية، وتحسن جودتها بشكل متنوع، فعلى سبيل المثال، فإنه يغير رائحة الطعام ونكهته وملمسه، ويعزز أحيانًا العمر الافتراضي للمنتجات المخمرة أيضًا، ويتم كذلك استخدام مزيج من مزارع تخمير البكتيريا والفطريات المختلطة في كثير من التطبيقات مثل في أثناء إنتاج المشروبات الكحولية مثل النبيذ والبيرة، ومنتجات الألبان مثل الجبن والكفير، والعجين المخمر. ومع ذلك، فهناك عدد قليل جدًّا من التحقيقات المتعلقة بالتفاعلات بين البكتيريا والفطريات على المستوى الخلوي في أثناء عملية التخمير، ولا يمكن استخدام الخميرة لتعزيز استخدام البادئ البكتيري كمزارع؛ لأن آلية تفاعلها الخلوي لم يتم توضيحها بشكل شامل بعد (Viljoen, 2001). وفي المقابل، تم إجراء تحقيق أكثر تفصيلًا في التفاعل الجزيئي لبكتيريا lactic acid (LAB) المنتج للأيض المضاد للفطريات والفطريات الملوثة في منتجات المخابز والجبن والبيرة، وينتج LAB مركبات مضادة للفطريات مثل الأحماض العضوية (فينيل لاكتيك Phenyl lactic، وبروبيونيك Propionic، وأسيتيك Acetic، ولاكتيكLactic)، وبيروكسيد الهيدروجين Hydrogen peroxide، وثنائي الببتيدات الحلقية Cyclic dipeptides، وأحماض هيدروكسي الدهنية Hydroxy fatty acids، والروترين Reuterin، وكذلك مواد بروتينية وفينولية غير مميزة (Dalié et al., 2010). وعلاوة على ذلك، يمكن أن تمنع الخميرة نمو البكتيريا الملوثة *Listeria monocytogenes* في الجبن المسطح (Goerges et al. 2006). وحاليًّا، تم تكريس جهود مكثفة نحو استخدام عملية التخمير لتنمية الكائنات الحية الدقيقة التي لها تأثيرات مثبطة للبكتيريا والفطريات المسؤولة عن التسبب في تدني الجودة وانخفاض القيمة الغذائية، حيث أصبحت الحاجة إلى الأطعمة الخالية من الإضافات ذات أهمية متزايدة، وعلاوة على ذلك، يمكن التقليل من خطر تلف الطعام عن طريق القوالب المنتجة للسموم الفطرية أو البكتيريا المسببة للأمراض باستخدام مزارع بادئ مثبطة، ويعكس هذا النوع من التسمم الغذائي خطرًا معقولًا على الصحة العامة، ويشكل تهديدًا للاقتصاد، ويُعدّ التحول الأحيائي والتحلل الحيوي للسموم الفطرية بواسطة الكائنات الحية الدقيقة من أحدث مجالات البحث المستخدمة للحد من التسمم الغذائي (Jard et al. 2011). وغالبًا ما تتلوث الأطعمة والأعلاف الأخرى بالسموم الفطرية مثل الأفلاتوكسين aflatoxin، والزيارالينون

Zearalenone، والفومونيزين Fumonisin، والتريكوثيسين Trichothecene ما يؤدي إلى تفاعلات سامة عند الامتصاص اللاحق.

ويمكن تحويل هذه السموم الفطرية بسهولة أو حتى تتحلل بواسطة بكتيريا عدة، كما هي مفيدة، تتطلب عملية التحلل الميكروبي تحليلًا نقديًّا ثاقبًا؛ لأنه لا تحتاج جميع تفاعلات التحول الأحيائي إلى إزالة السموم الفطرية، وعلاوة على ذلك، من الضروري إجراء تقييم لتحديد ثبات المنتج المحول بعد استهلاك الإنسان والحيوان (Scherlach et al. 2013)، ويمكن أن يساعد ذلك على تحديد فائدته أو الآثار المحتملة طويلة الأجل أو قصيرة المدى، وعلى الرغم من حقيقة أن كثيرًا من البكتيريا التي تم فحصها حتى الآن قد أشارت إلى إمكانات التحلل والتحول، يبدو أن استخدام أنزيمات التحويل الأحيائي التي يتم تسخيرها من نفس الكائنات الحية الدقيقة تظهر فاعلية أعلى مقارنة بوقت استخدام الكائنات الحية الدقيقة للعلاج (Jard et al. 2011).

ومن ناحية أخرى، فإن التأثيرات المفيدة للكائنات الحية الدقيقة في المزارع المختلطة (تفاعلات البكتيريا والفطريات) في إنتاج الغذاء قد تتسبب أيضًا في تلوث الطعام ومن ثم تؤثر بشكل كبير في صحة الإنسان، ويتجسد هذا السيناريو في Tempe bongkrek، وهو طبق مشتق من جوز الهند ومتوافر بشكل شائع في جنوب شرق آسيا، وهذا المنتج مشتق من عملية تخمير كعكة ضغط جوز الهند باستخدام فطر Rhizopus oligosporus الذي يستخدم كثيرًا كمزارع بادئ في إنتاج طبق tempeh في البيوت وفي الصناعة (Buckle and Kartadarma1990).

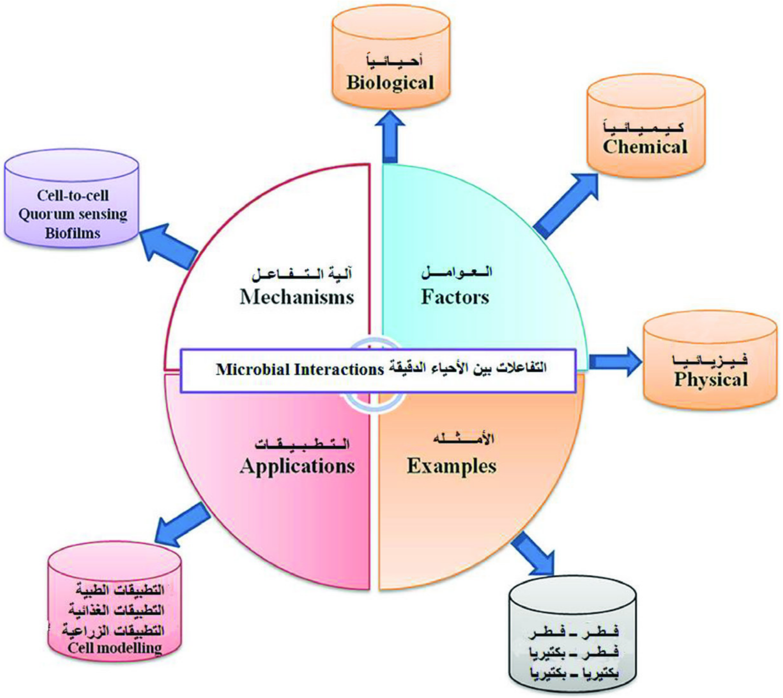
ثالثًا: التطبيقات الزراعية Agricultural Applications

قد يساعد استخدام المعرفة حول فوائد التفاعلات بين النبات والكائنات الحية الدقيقة على زيادة العائد في إنتاج الغذاء مع تقليل الإجهاد البيئي والتنوع البيولوجي العالمي، ويتأثر التضمين البيئي الأساسي لوظيفة التربة الذي يشمل الدورات البيوجيوكيميائية بالنباتات ببنية مجموعة من الكائنات الحية الدقيقة ودورها في الجذور، وهذا يعني أيضًا أن الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في التربة تؤدي وظيفة مهمة في صحة النباتات وإنتاجيتها (Bloemberg and Lugtenberg 2001). وإن مسألة الوظيفة الأساسية التي يؤديها المجتمع الميكروبي الذي يتفاعل بشكل وثيق مع النباتات للتأثير في صحتها وتنوعها البيولوجي وإنتاجيتها لم يتم استكشافها بشكل كبير حاليًّا، وتقدم الكائنات الحية الدقيقة مستوى معينًا من الحماية ضد أمراض النبات بوصفه ميزة إضافية لتعزيز إمداد النباتات بالمغذيات (Cavaliere et al. 2017). وبشكل خاص، البكتيريا والفطريات المختلفة -خاصة من أجناس Pseudomonas وBacillus وTrichoderma- تنتج منتجات كيميائية عدة ضد الفطريات الأخرى الممرضة للنبات(Bloemberg and Lugtenberg (2001. وعوامل المكافحة الحيوية مثل تلك المستخدمة حاليًّا بكفاءة في هذا المجال، لم تصل بعد إلى المستوى المطلوب من الفعالية والاتساق الضروريين للتسويق على نطاق واسع، وعلى الرغم من أن هناك

دائمًا فرصًا للتحسين، ومن خلال التطورات المستمرة يمكن استخدام الكائنات الحية الدقيقة بوصفها خيارات مناسبة في أنظمة مبيدات الفطريات الثقيلة المستخدمة حاليًّا في الزراعة، وإن تقليل استخدام المواد الكيميائية من هذا النوع سيكون ذا فائدة مباشرة للبيئة، ويمكن أن يزيد من شهية المستهلكين النهائيين الذين يتوقون إلى المزيد من المنتجات الطبيعية (Morrissey et al., 2004).

تعد الفطريات الجذرية الشجيرية Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) من الأشكال الشائعة في التربة، وتميل هذه إلى إنشاء رابط مادي مباشر بين التربة وجذور النباتات (Tiwari and Lata 2018). ومن ثم، هناك امتصاص مرتفع للمغذيات نتيجة لزيادة مساحة السطح بين جذور النبات والتربة، وهذا يضع AMF في ميزة مهمة للمشاركة بشكل مباشر في تخفيف التربة من غزو المعادن الثقيلة التي يمكن نقلها إلى النبات المضيف، ومع ذلك، فإن قدرة AMF على تنفيذ هذه الوظيفة الحاسمة تعتمد بشكل كبير على عوامل عدة، مثل الأنواع المتفاعلة وأنواع المعادن وتوافرها اللاحق وخصوبة التربة وظروف نمو النبات مثل كثافة الضوء، وكثافة الجذور، ونوع النبات (Pawlowska and Charvat, 2004). وإضافة إلى ذلك، يُعدّ التفاعل الثلاثي للكائنات المسببة للأمراض والحيوانات آكلة الأعشاب والنباتات أيضًا، ليكون علاقة مفيدة في تعزيز غلة المحاصيل (Willsey et al. 2017). وهذه العلاقة الفريدة المميزة تتعلق بالفيروسات والفطريات والنباتات، وقد تم العثور على هذه العلاقة التكافلية ثلاثية الاتجاهات لتكون تمهيدية للتسامح الحراري، ووُجِد كذلك أن الفطر داخلي النمو Endophyte وعشب الذعر الاستوائي نموا بشكل متبادل في درجات حرارة مرتفعة من التربة، وتم إرجاع تفسير هذه الظاهرة إلى الفيروس الذي أصاب الفطريات داخل العشب، وتم تأكيد النتائج من خلال اختبار مقاومة الحرارة للفطر المعالج بالفيروس، وقد أظهرت النتائج أن الفطريات المعالجة لم تستطع تحمل درجات حرارة تصل إلى 65 درجة مئوية، ومن ثم، يُعتقَد أن تحمل الحرارة من خلال الفيروس الموجود في الفطريات داخل العشب، وكان هذا لأنه عندما أصيبت الفطريات بالفيروس مرة أخرى، تمت استعادة القدرة على تحمل الحرارة، واستنادًا إلى حقيقة أن توفير الفيروس لتحمل الحرارة تجاوز مضيفه الأحادي الأصلي إلى مضيف آخر خاص به؛ ولذا كان الاستنتاج أنه يجب أن يكون هناك بعض المسارات الخاصة التي تميز آلية التفاعل بين الفيروس، والفطريات، والنبات (Márquez et al. 2007).

ويمكن أن توفر الدراسات البيوكيميائية المتعمقة لهذه المسارات مزيدًا من المعلومات المفيدة لتشكيل الأساس لاستخدام بعض الفطريات المصابة بالفيروس في آليات المكافحة الحيوية، ومن ثم، سيتم إعادة إنتاج المحاصيل العالية، وبناء عليه يمكن أن يؤدي إلى تقدم كبير في الزراعة، وخاصة في مكافحة الآفات.


أحيائياً Biological
كيميائياً Chemical
فيزيائياً Physical
Cell-to-cell
Quorum sensing
Biofilms
آلية التفاعل Mechanisms
العوامل Factors
Microbial Interactions التفاعلات بين الأحياء الدقيقة
التطبيقات Applications
الأمثله Examples
التطبيقات الطبية
التطبيقات الغذائية
التطبيقات الزراعية
Cell modelling
فطر - فطر
فطر - بكتيريا
بكتيريا - بكتيريا

الشكل (2-10): عوامل التفاعل بين الأحياء الدقيقة وآلية التفاعل والأمثلة والتطبيقات.

الأهمية البيئية لتفاعلات الأحياء الدقيقة
The Environmental role of Microbial Interactions

الأنشطة البشرية الروتينية مثل الزراعة، والتنقيب عن المعادن، وأشكال التصنيع الأخرى التي تهدف إلى استدامة الحياة لها القدرة على التأثير سلبًا في النظام البيئي الطبيعي، وتأتي هذه التأثيرات في شكل اضطرابات في التربة والمياه والهواء (Tiwari and Lata 2018) وهي وسائط البقاء داخل البيئة، ولقد ثبت أن التفاعل المتوافق بين النباتات وبعض أنواع الأحياء الدقيقة يساعد على التحكم في تراكم المعادن الثقيلة في النباتات (Tiwari and Lata 2018). وتتمتع التفاعلات نفسها أيضًا بالقدرة على إحداث انخفاض ملحوظ في توافر المعادن الضارة من خلال سلسلة من العمليات، وهذه الآليات التفاعلية ضرورية لمنع الضرر اللاحق لنسيج التربة، ويعزى ذلك إلى تأثيرات العناصر المختلفة في التربة، وقد يكون لتراكم العناصر في التربة تأثير سلبي في نمو النبات؛ لأنه يؤثر في كثير من العمليات الفسيولوجية والجزيئية داخل النباتات، وتشمل أمثلة المعادن عالية السمية الزرنيخ (As)، والكادميوم (Cd)، والزئبق (Hg)، والرصاص (Pb)، وما إلى ذلك، وتؤثر هذه العناصر بشكل مباشر في غلات المحاصيل بسبب تركيزاتها المرتفعة التي تتجاوز عتبات معينة (Xiong et al. 2014).

وفي البيئة، تؤدي البكتيريا دورًا مهمًّا في معالجة التربة لاستردادها من التلوث بالمعادن الثقيلة، وتحقق البكتيريا المذكورة هذا من خلال ثلاث عمليات رئيسة هي: تعبئة المعادن نفسها، والتحول

وإزالة السموم (Tiwari and Lata 2018). والآليات المحددة التي من خلالها تقوم الكائنات الحية الدقيقة بإنجاز هذه العمليات المعقدة وغيرها تحتاج إلى دراسة شاملة واستكشافات عميقة متخصصة، ويجب أن يكون التركيز الأكثر أهمية في دراسة مثل هذه الآليات هو التركيز على العوامل التي تتحكم فيها، ويمكن إرجاع بعض هذه العوامل إلى التكيف الجيني والبنيوي، ويمكن لهذه الآليات أن تقود إلى اكتشافات جديدة إذا تم تحليل اتجاهات حدوثها بشكل جوهري ومتعمق وإجراء دراسات إضافية، وتمتلك بعض الأنواع الفطرية مثل Penicilium وAsoergillus وMucor وTrichoderma قدرات خاصة لمقاومة الصدمات الناتجة عن المعادن الثقيلة (Oladipo et al. 2018). وترتبط هذه الخاصية الفطرية الفريدة بالتركيب الكيميائي لجدارها الخلوي، ويمكن أن تربط هذه المعادن وتطبعها بسبب وجود مجموعات وظيفية مختلفة مثل الفوسفات، والكربوكسيل، والأمينات على جدارها الخلوي (Ullah et al. 2017b Tiwari and Lata 2018).

ومن الضروري فهم استجابة الكائنات الحية الدقيقة للإشارات من النباتات من أجل استكشاف فائدة مثل هذه التفاعلات، وفيما يتعلق بما إذا كان مستقبل تطورات التكنولوجيا الحيوية في الزراعة يعتمد على تقنية تعديل الجينات أو على التربية التقليدية، يجب أن يؤخذ في الحسبان فوائد جمعيات النباتات والكائنات الحية الدقيقة، ويتركز قطاع التكنولوجيا الحيوية النباتية (التقليدية) حول تربية النبات وفي النهاية اختيار الخصائص المفيدة، وهو أقل ما يؤخذ في الحسبان بيئة ارتباط النبات بالكائنات الحية الدقيقة. ومع ذلك، فإن التعبير عن السمات المرغوبة، مثل مقاومة الأمراض،

أو الجفاف وتحمل الملوحة، يمكن أيضًا أن يتأثر بشكل مباشر بالتفاعلات بين مجموعة متنوعة من النباتات وشريكها من النباتات الميكروبية المتفاعلة، وسيناريو مختلف ممكن أيضًا، حيث قد تشارك أنواع معينة من النباتات في ارتباط تفاعلي مع الكائنات الحية الدقيقة ذات الخصائص غير المرغوب فيها.

فلا بد من العمل على إيجاد تفسير واضح للأساس الجيني للتفاعلات بين النباتات والكائنات الحية الدقيقة مع الأخذ في الحسبان الآلية التي يمكن من خلالها لنبات معين تحديد شريكه المتفاعل بشكل انتقائي داخل مجموعة من ميكروبيوتا التربة soil microbiota، ما يفسح المجال لـ (تكييف) الغلاف الجذري Rhizosphere لتعزيز خصائص أكثر استدامة في النبات، وهو أساس فعال للتربة الطبيعية المثبطة للأمراض، وغالبًا ما يتم التحكم بشكل صارم في التعبير العنقودي للجينات التخليقية من أجل تلبية الاحتياجات المتغيرة للظروف البيئية، وفي مزارع الكائنات الحية الدقيقة النقية، عادةً ما تظل جينات التخليق الحيوي للمنتجات الطبيعية صامتة ومن ثم لا يتم غالبًا حصاد كثير من المنتجات الأيضية، وفي هذه الحالة، يصبح استغلال تجارب المزارع الميكروبية المختلطة في ضوء تحفيز مثل هذه الجينات الصامتة لتسخير العمليات الأيضية الناتجة المحتملة أولوية في أبحاث اليوم الحالي، وتخمر الطعام في مزارع الكائنات الحية الدقيقة المختلطة له ميزة اقتصادية

مهمة، وإن المزارع الميكروبية التي تتكون من بكتيريا Lactic acid (LAB) والخميرة والفطريات الخيطية تجعل أداءها أكثر من مجرد تعايش وظائف الخلايا الفردية أحادية السلالة، ولكن يتم تحديدها بشكل أساسي من خلال تفاعلات مستوى مواد التخمر، وتبادل العمليات الأيضية، وتعزيز النمو أو عوامل تثبيط النمو.

وقد كشفت الاختراقات التي أعقبت أحدث التطورات في تكنولوجيا الجينات عن محاولات جديدة لدراسة مجتمعات الميكروبات والشبكات المترابطة أكثر من النماذج الشائعة القائمة على الأوصاف الاستنتاجية، إضافة إلى ذلك، استخدمت الدراسات التي كان أساسها أكثر حول تحقيق فهم للمبادئ البيئية الأساسية وراء نجاح الإستراتيجيات التطورية سلالات المختبرات الاصطناعية والأنظمة البيئية، ومن ثم يتم توفير تقنية بديلة أكثر حيلة ذات صلة عملية عالية عن طريق تخمير الطعام، والدراسة المتعمقة للوجود الحالي لعلم الجينوم المتقدم والأدوات الوراثية لديها القدرة على السماح بالجمع بين الأساليب الميكانيكية والتطورية لتوفير حلول لتحديات الحياة المحتملة، ويوفر التعرض للمعرفة حول أنواع تفاعل الكائنات الحية الدقيقة المختلفة وفائدتها مجالًا وبيئة خصبة لتوليد ميكروبيومات microbiomes تركيبية جيدة التنظيم يمكن تطبيقها في كثير من الأماكن، فعلى سبيل المثال، حل التحديات المهمة المتعلقة بالصحة ومعالجة المعادن الثقيلة، وما إلى ذلك، وتُعدّ الأنشطة الأيضية الطبيعية للخلايا المتفاعلة حاسمة بشكل مفيد في العمل بوصفها (محركات حيوية) للأيضيات الأساسية مثل المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) والمستقلبات الحاسمة.

البيئات الغذائية لعزل الأحياء الدقيقة

أولًا: البيئات الغذائية الصلبة المستخدمة في نمو وعزل البكتيريا والفطريات:

1. بيئة الآجار لأطباق العد البكتيري Plate Count Agar:

Composition التركيب	quantity الكمية
g 5.0	Tryptone
g 2.5	Yeast extract
g 1.0	Glucose
g 9.0	Agar

Distilled water	litre 1.0

pH adjusted to 7.0 ± 0.2

يتم إذابة 17,5جم من مسحوق المرق المغذي (Oxoid) Plate Count agar في لتر ماء مقطر، وتذاب البيئة، ويتم تعقيمها بواسطة الأوتوكلاف عند درجة حرارة 120 لمدة ربع ساعة.

---

2. بيئة يوريا الآجار للبكتيريا المحللة لليوريا Urea Agar for ureolytic bacteria:

التركيب Composition	الكمية Quantity
Peptone (Oxoid)	g 1.0
K2HPO4	g 1.0
MgSO4.7H2O	g 0.5
NaCl	g 1.0
CaCO3	g 1.0
Trace element solution	ml 1.0
Glucose	g 1.0
Urea	g 10.0
Agar	g 15.0
Distilled water	litre 1.0

The trace element solution consisted of:

g 0.1	FeSO4.7H2O
g 0.1	MnCl2.4H2O
g 0.1	ZnSO4.7H2O
ml 100	Distilled water

3- بيئة عزل الخميرة Martin's medium for yeast isolation:

الكمية quantity	التركيب Composition
g 10.0	Dextrose
g 5.0	Peptone
g 1.0	KH2PO4
g 0.5	MgSO4.7H2O
g 20.0	Agar
litre 1.0	Distilled water
pH adjusted to 3.8	0

يتم إذابة المركبات المذكورة أعلاه من بيئة Martin بكمياتها المحددة في لتر ماء مقطر، وتذاب البيئة، ويتم تعقيمها بواسطة الأوتوكلاف عند درجة حرارة 120 لمدة ربع ساعة.

4- بيئة الآجار تشبك دوكس لعزل الفطريات Czapek-Dox Agar:

الكمية quantity	التركيب Composition

g 2.00	NaNO3
g 0.50	KCl
g 0.50	Magnesium glycerophosphate
g 0.01	FeSO4
g 0.35	K2SO4
g 30.0	Sucrose
g 12.0	Agar (Oxoid No. 3)
litre 1.0	Distilled water
pH adjusted to 6.8	0

يتم إذابة 45,4جم من مسحوق تشبك دوكس Czapek-Dox agar (Oxoid) في لتر ماء مقطر، وتذاب البيئة، ويتم تعقيمها بواسطة الأوتوكلاف عند درجة حرارة 120 لمدة ربع ساعة.

5- بيئة السيليكا جل لعزل الفطريات الأوليجوتروفية **Silica gel medium:**

الكمية quantity	التركيب Composition
g 1.00	KH2PO4
g0 0.5	KCl
g 0.50	MgSO4.7H2O
g 0.01	FeSO4.7H2O

litre 1.0	Purified distilled water

0 pH was adjusted to 5.2 ± 0.2

ثانيًا: البيئات الغذائية السائلة المستخدمة في نمو وعزل البكتيريا والفطريات:

1- بيئة تشبك دوكس السائلة لعزل الفطريات **liquid medium Czapek-Dox:**

الكمية quantity	التركيب Composition
g 2.00	NaNO3
g 0.50	KCl
g 0.50	Magnesium glycerophosphate
g 0.01	FeSO4
g 0.35	K2SO4
g 30.0	Sucrose
litre 1.0	Distilled water

pH adjusted to 6.8

يتم إذابة 33,4جم من مسحوق تشبك دوكس Czapek-Dox (Oxoid) في لتر ماء مقطر، وتذاب البيئة، ويتم تعقيمها بواسطة الأوتوكلاف عند درجة حرارة 120 لمدة ربع ساعة.

2- بيئة تشبك دوكس السائلة الخالية من الكربون لعزل الفطريات

Czapek-Dox C-free liquid medium

الكمية quantity	التركيب Composition
g 2.00	$NaNO_3$
g 0.50	KCl
g 0.50	Magnesium glycerophosphate
g 0.01	$FeSO_4$
g 0.35	K_2SO_4
litre 1.0	Distilled water

pH adjusted to 6.8

يتم إذابة 33,4جم من مسحوق تشبك دوكس Czapek-Dox (Oxoid) في لتر ماء مقطر، وتذاب البيئة، ويتم تعقيمها بواسطة الأوتوكلاف عند درجة حرارة 120 لمدة ربع ساعة.

3- بيئة تشبك دوكس السائلة الخالية من النيتروجين لعزل الفطريات

Czapek-Dox N-free liquid medium

الكمية quantity	التركيب Composition
g 0.50	KCl
g 0.50	Magnesium glycerophosphate
g 0.01	FeSO4
g 0.35	K2SO4
g 30.0	Sucrose

litre 1.0	Distilled water

pH adjusted to 6.8

يتم إذابة 33,4جم من مسحوق تشبك دوكس Czapek-Dox (Oxoid) في لتر ماء مقطر، وتذاب البيئة، ويتم تعقيمها بواسطة الأوتوكلاف عند درجة حرارة 120 لمدة ربع ساعة.

4- بيئة تشبك دوكس السائلة الخالية من الكربون والنيتروجين لعزل الفطريات Czapek-Dox C-free N-free liquid medium

الكمية quantity	التركيب Composition
g 0.50	KCl
g 0.50	Magnesium glycerophosphate
g 0.01	FeSO4
g 0.35	K2SO4
litre 1.0	Distilled water

pH adjusted to 6.8

يتم إذابة 33,4جم من مسحوق تشبك دوكس Czapek-Dox (Oxoid) في لتر ماء مقطر، وتذاب البيئة، ويتم تعقيمها بواسطة الأوتوكلاف عند درجة حرارة 120 لمدة ربع ساعة.

References المراجع

أولًا- المراجع العربيـة

- أبو زنادة، عبدالعزيز حامد (1403هـ). أساسيات علم الكائنات الحية الدقيقة. عمادة شؤون المكتبات، جامعة الملك سعود، الرياض، المملكة العربية السعودية.

- البسيوني، حسين، ماهر (2001م). علم الفيروسات. عمادة شؤون المكتبات، جامعة الملك سعود، الرياض: المملكة العربية السعودية.

- بغدادي، وفاء (1974م). المشريات ـ تصنيف الأشنيات. جامعة دمشق، دمشق: الجمهورية العربية السورية.

- الترك، إدريس منير والسراني، عبدالعزيز قبلان والحسيني، محمد محمد (2002م). البكتيريا. مكتبة دار الإيمان، المدينة المنورة: المملكة العربية السعودية.

- جبر، محمود محمد وكامل، إسماعيل محمد وشبانة، عفت فهمي و قبية، الإمام عبده (2001م). أساسيات علم النبات العام. دار الفكر العربي، القاهرة: جمهورية مصر العربية.

- الرحمة، عبدالله ناصر (1998م). أساسيات علم الفطريات (الطبعة الثالثة). عمادة شؤون المكتبات، جامعة الملك سعود، الرياض: المملكة العربية السعودية.

- ريفن، بيتر أتش و إيفرت، راي إف وأيكهورن، سوزان أي: ترجمة الوهيبي، محمد حمد والخليل، عبدالله الصالح (2002م). علم أحياء النبات (الجزء الأول). عمادة شؤون المكتبات، جامعة الملك سعود، الرياض: المملكة العربية السعودية.

- السراني، عبدالعزيز قبلان و الترك، إدريس منير و الحسيني، محمد محمد (2002م). الفطريات. مكتبة دار الإيمان، المدينة المنورة: المملكة العربية السعودية.

- السراني، عبدالعزيز قبلان و الترك، إدريس منير و الحسيني، محمد محمد (2000م). الطحالب. مكتبة أبو عظمة للكتب والقرطاسية، المدينة المنورة: المملكة العربية السعودية.

- طرابلسي، إبراهيم يوسف (2001م). الميكروبيولوجيا الزراعية. عمادة شؤون المكتبات، جامعة الملك سعود، الرياض: المملكة العربية السعودية.

- عبدالحافظ، محمد جميل (1998م). فسيولوجيا النبات (الطبعة الثانية). عمادة شؤون المكتبات، جامعة الملك سعود، الرياض: المملكة العربية السعودية.

- عبدالمعطي، أشرف صبحي (1999م). ترشيد المياه واقع وآفاق. دار ومكتبة الإسراء، طنطا، مصر.

- عثمان، محمد السيد و أحمد، محمد سليمان و خطاب، أم كلثوم حسن و الهنداوي، هدى حامد (2000م). مقدمة علم تقسيم النبات. كلية العلوم، جامعة حلوان، القاهرة: جمهورية مصر العربية.

- العروسي، حسين و وصفي، عماد الدين (2001م). المملكة النباتية. مكتبة المعارف الحديثة، الإسكندرية: جمهورية مصر العربية.

- الغنيم، مرزوق يوسف و صرماني، علي دياب و الشوري، حامد محمد (1996م). عالم النبات والكائنات الدقيقة. مطبعة الفجر الكويتية، الكويت: الكويت.

- الفالح، عبدالله مساعد (1426هـ) عظمة الله في النبات، مكتبة الرشد، الرياض، المملكة العربية السعودية.

- الفالح، عبدالله مساعد (1428هـ) البيئة النباتية، دار الخريجي للنشر والتوزيع، الرياض، المملكة العربية السعودية.

- الفالح، عبدالله مساعد و عياش، عبدالكريم شريف (1424هـ) أساسيات علم تقسيم النبات، دار الخريجي للنشر والتوزيع، الرياض، المملكة العربية السعودية.

- النخال، حمزة محمد محمد السيد (1998م) علم الأحياء الدقيقة. مطابع الطوبجي التجارية، القاهرة، مصر.

- الوهيبي، محمد بن حمد (2008م). بكتيريا المحيط الجذري المنشطة لنمو النبات. مجلة علوم الحياة السعودية، مجلد 15 رقم (3).

- ويلسون، كارل إل ولوميس، وولتر أي وستيفز، تايلور أي: ترجمة أبو رية، محمد أحمد والألوسي، حازم صادق والبكري، محمد سمير إبراهيم (1989م). علم النبات. الهيئة القومية للبحث العلمي، طرابلس: الجماهيرية العربية الليبية.

ثانيًا- المراجع الأجنبية

- Adair, C. G., Gorman, S. P., Byers, L. M., Jones, D. S., Goldsmith, C. E., Moore, J. E., et al. (1999). Implications of endotracheal tube biofilm for ventilator-associated pneumonia. Intensive Care Med. 25, 1072–1076.
- Adams M R and Moss (1995) Food Microbiology. The Royal Society of Chemistry. Cambridge.
- Adonizio, A., Kong, K.-F., and Mathee, K. (2008). Inhibition of Quorum Sensing-Controlled Virulence Factor Production in Pseudomonas aeruginosa by South Florida Plant Extracts. Antimicrob. Agents Chemother. 52, 198–203.
- Agerer, R. (2001). Exploration types of ectomycorrhizae. a proposal to classify ectomycorrhizal mycelial systems according to their patterns of differentiation and putative ecological importance. Mycorrhiza 11, 107–114.
- Ahemad, M. (2015). Phosphate-solubilizing bacteria-assisted phytoremediation of metalliferous soils: a review. 3 Biotech 5, 111–121.
- Ahmed, E., and Holmstrom, S. J. (2014). Siderophores in environmental research: roles and applications. Microb. Biotechnol. 7, 196–208.
- Akhtar, M. S., and Siddiqui, Z. A. (2009). Use of plant growth-promoting rhizobacteria for the biocontrol of root-rot disease complex of chickpea. Australas. Plant Path. 38, 44–50.
- Akladious, S. A., and Abbas, S. M. (2012). Application of Trichoderma harziunum T22 as a biofertilizer supporting maize growth. Afr. J. Biotechnol. 11, 8672–8683.
- Alexander M (1971) Microbial Ecology, John Wiley and Sons Inc. NY.
- Alexander M (1977) Introduction to Soil Microbiology John Wiley Sons, Inc. NY.

- Alexandre, H., Costello, P. J., Remize, F., Guzzo, J., and Guilloux-Benatier, M. (2004). Saccharomyces cerevisiae–Oenococcus oeni interactions in wine: current knowledge and perspectives. Int. J. Food Microbiol. 93, 141–154.

- Al-Falih, A. M. (1997). Production of Extracellular Enzymes by Some Soil Yeasts. Qatar Univ. Sci. Journal 17 (1): 97-102.

- Al-Falih, A. M. (2002). Factors Affecting the Efficiency of Symbiotic Nitrogen Fixation by Rhizobium. Pakistan Journal of Biological Sciences 5 (11): 1277-1293, Pakistan.

- Al-Falih, A. M. and Al-Julaifi, M. (2002). Mycoflora and Aflatoxins Producing Fungi of Cottonseed in Saudi Arabia. J. of Agriculture King Saud Univ. 15 (1): 25-33.

- Al-Falih, A. M., Al-Jaloud, A. (2003). Microbiological Studies on Some Organic Materials Used as Soil Conditioners. J. of Agriculture King Saud Univ. 15 (2): 153-165.

- Al-Falih, A. M., Wainwright, M. (1995). Nitrification, S-Oxidation and P-Solubiliztion by Some of Soil Yeast Williopsis californica and by Saccharomyces cerevisiae. Mycological Research.99 (2): 200-204.

- Allen, M. F. (2007). Mycorrhixal fungi: highways for water and nutrients in arid soils. Vadose Zone J. 6, 291–297.

- Allende, A., Martinez, B., Selma, V., Gill, M., Suarez, J., and Rodriguez, A. (2007). Growth and bacteriocin production by lactic acid bacteria in vegetable broth and their effectiveness at reducing Listeria monocytogenes in vitro and in fresh-cut lettuce. Food Microbiol. 24, 759–766.

- Al-Whaibi, M.H. (2005). Plants and diazotrophic bacteria. King Saud University Journal (Agriculture Section) 5(2): 60-73.

- Andersson, S., Dalhammar, G., and Kuttuva Rajarao, G. (2011). Influence of microbial interactions and EPS/polysaccharide composition on nutrient removal activity in biofilms formed by strains found in wastewater treatment systems. Microbiol. Res. 166, 449–457.

- Arora, N. K., Mehnaz, S., and Balestrini, R. (2016). Bioformulations: For Sustainable Agriculture. Berlin: Springer.

- Artursson, V., Finlay, R. D., and Jansson, J. K. (2006). Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria and their potential for stimulating plant growth. Environ. Microbiol. 8, 1–10.

- Aslantas¸ R.,Cakmakci and Sahin, F. (2007). Effect of plant growth promoting rhizobacteria on young apple tree growth and fruit yield under orchard conditions. Scientia Horticulturae 111: 371–377.

- Aspray, T. J., Frey-Klett, P., Jones, J. E., Whipps, J. M., Garbaye, J., and Bending, G. D. (2006). Mycorrhization helper bacteria: a case of specificity for altering ectomycorrhiza architecture but not ectomycorrhiza formation. Mycorrhiza 16, 533–541.

- Atlas R M (1986) Basic and Practical Microbiology Mac Millan Co. NY.

- Atlas R M. and Bartha, R. (1993) Microbial Ecology Fundamentals and Applications. Benjamin/Cummings Publishing Co. New York.

- Azoulay, E., Timsit, J.-F., Tafflet, M., De Lassence, A., Darmon, M., Zahar, J.-R., et al. (2006). Candida colonization of the respiratory tract and subsequent Pseudomonas Ventilator-Associated Pneumonia. Chest 129, 110–117.

- Bais, H. P., Weir, T. L., Perry, L. G., Gilroy, S., and Vivanco, J. M. (2006). The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. Annu. Rev. Plant Biol. 57, 233–266.

- Bakker, M. G., Manter, D. K., Sheflin, A. M., Weir, T. L., and Vivanco, J. M. (2012). Harnessing the rhizosphere microbiome through plant breeding and agricultural management. Plant Soil 360, 1–13.

● Baltz, R. H. and G. D. Hegemann (1993) Industrial Microorganisms. American Society for Microbiology, Washington, D.C., U.S.A.

● Bamford, C. V., d'Mello, A., Nobbs, A. H., Dutton, L. C., Vickerman, M. M., and Jenkinson, H. F. (2009). Streptococcus gordonii modulates Candida albicans biofilm formation through intergeneric communication. Infect. Immun. 77, 3696–3704.

● Barea, J. M. (2015). Future challenges and perspectives for applying microbial biotechnology in sustainable agriculture based on a better understanding of plant-microbiome interactions. J. Soil Sci. Plant Nutr. 15, 261–282.

● Barea, J.M., Pozo, M.J., Azcon, R. and Anguilar, C.A. (2005). Microbial co-operation in the rhizosphere. J. Exp. Botany. 56 (417): 1761-1778.

● Bashan, Y., and de-Bashan, L. E. (2015). "Inoculant preparation and formulations for azospirillum spp," in Handbook for Azospirillum, eds F. D. Cassán, Y. Okon, and C. M. Creus (Berlin: Springer), 469–485.

● Bashan, Y., Holguin, G. and de-Bashan, L.E. (2004). Azospirillum-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003). Canadian Journal of Microbiology 50: 521-577.

● Beattie, G. A. (2015). Microbiomes: curating communities from plants. Nature 528, 340–341.

● Bender, S. F., Wagg, C., and Van Der Heijden, M. G. (2016). An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. Trends Ecol. Evol. 31, 440–452.

● Berg, G., Grube, M., Schloter, M., and Smalla, K. (2014). Unraveling the plant microbiome: looking back and future perspectives. Front. Microbiol. 5:148.

● Bergey, P. (1984). Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Williams and Wilkins, Baltimore: U. S. A.

● Bharti, N., Pandey, S. S., Barnawal, D., Patel, V. K., and Kalra, A. (2016). Plant growth promoting rhizobacteria Dietzia natronolimnaea modulates the expression of stress responsive genes providing protection of wheat from salinity stress. Sci. Rep. 6:34768

● Blekhman, R., Goodrich, J. K., Huang, K., Sun, Q., Bukowski, R., Bell, J. T., et al. (2015). Host genetic variation impacts microbiome composition across human body sites. Genome Biol. 16:191●

● Microbiological .Bloem, J, Hopkins,D. W. and Benedetti, A. (2006) methods for assessing soil quality. CABI Publishing. UK.

● Bloemberg, G. V., and Lugtenberg, B. J. J. (2001). Molecular basis of plant growth promotion and biocontrol by rhizobacteria. Curr. Opin. Plant Biol. 4: 343-350.

● Board R G (1983) A Modern Introduction to Food Microbiology. Blackwell Scientific Pubs. Oxford.

● Bomberg, M., Münster, U., Pumpanen, J., Ilvesniemi, H., and Heinonsalo, J. (2011). Archaeal communities in boreal forest tree rhizospheres respond to changing soil temperatures. Microb. Ecol. 62, 205–217.

● Bonfante, P., and Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interations in mycorrhizal symbiosis. Nat. Commun. 1, 48.

● Bonfante, P., and Requena, N. (2011). Dating in the dark: how roots respond to fungal signals to establish arbuscular mycorrhizal symbiosis. Curr. Opin. Plant Biol. 14, 451–457.

● Bos, I. (1983) Introduction to Plant Virology, Longman, London and NY.

● Botelho, G.R. and Mendonça-Hagler, L.C. (2006). Fluorescent Pseudomonads associated with the rhizosphere of crops –An Overview. Brazilian Journal of Microbiology 37: 401-416.

- Bouyahya, A., Dakka, N., Et-Touys, A., Abrini, J., and Bakri, Y. (2017). Medicinal plant products targeting quorum sensing for combating bacterial infections. Asian Pac. J. Trop. Med. 10, 729–743.

- Brehm-Stecher, B., and Johnson, E. A. (2004). Single-cell microbiology: tools, technologies, and applications. Microbiol. Mol. Biol. R. 68, 538–559.

- Brock, T. D. and M.T Madigan (1991) Biology of Microorganisms, 6th Edition, Prentice-Hall International Inc., New Jersey, U.S.A.

- Brüssow, H. (2001). Phages of Dairy Bacteria. Annu. Rev. Microbiol. 55, 283–303

Buckle, K. A., and Kartadarma, E. (1990). Inhibition of bongkrek acid and toxoflavin production in tempe bongkrek containing Pseudomonas cocovenenans. J. Appl. Bacteriol. 68, 571–576.

- Bulgarelli, D., Schlaeppi, K., Spaepen, S., Ver Loren Van Themaat, E., and Schulze-Lefert, P. (2013). Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. Annu. Rev. Plant Biol. 64, 807–838.

- Burmolle, M., Webb, J. S., Rao, D., Hansen, L. H., Sorensen, S. J., and Kjelleberg, S. (2006). Enhanced biofilm formation and increased resistance to antimicrobial agents and bacterial invasion are caused by synergistic interactions in multispecies biofilms. Appl. Environ. Microbiol. 72, 3916–3923.

- Burns, J. L., Van Dalfsen, J. M., Shawar, R. M., Otto, K. L., Garber, R. L., Quan, J. M., et al. (1999). Effect of chronic intermittent administration of inhaled tobramycin on respiratory microbial flora in patients with cystic fibrosis. J. Infect. Dis. 179, 1190–1196.

- A, (2005). Microorganisms in soils: roles in .Buscot, F. and Varma genesis and functions. Springer Berlin, Germany.

- Caplice, E., and Fitzgerald, G. (1999). Food fermentations: role of microorganisms in food production and preservation. Int. J. Food

Microbiol. 50, 131–149.

● Cavaliere, M., Feng, S., Soyer, O. S., and Jiménez, J. I. (2017). Cooperation in microbial communities and their biotechnological applications. Environ. Microbiol. 19, 2949–2963.

● Cavalier-Smith, T. (1981). Eukaryote Kingdoms: Seven or Nine Bio Systems 14: 461 – 481.

● Chabaud, M., Gherbi, H., Pirolles, E., Vaissayre, V., Fournier, J., Moukouanga, D., et al. (2016). Chitinase-resistant hydrophilic symbiotic factors secreted by Frankia activate both Ca2 + spiking and NIN gene expression in the actinorhizal plant Casuarina glauca. New Phytol. 209, 86–93.

● Chen, M., Xu, P., Zeng, G., Yang, C., Huang, D., and Zhang, J. (2015). Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: applications, microbes and future research needs. Biotechnol. Adv. 33, 745–755.

● Chen, X., Schauder, S., Potier, N., Van Dorsselaer, A., Pelczer, I., Bassler, B. L., et al. (2002). Structural identification of a bacterial quorum-sensing signal containing boron. Nature 415, 545–549.

● Cheng, Z.-M. (2014). Introduction to the Special Issue: Stress Biology of Specialty Crops. Didcot: Taylor & Francis.

● Chiang, Y. M., Szewczyk, E., Nayak, T., Davidson, A. D., Sanchez, J. F., Lo, H. C., et al. (2008). Molecular genetic mining of the aspergillus secondary metabolome: discovery of the emericellamide biosynthetic pathway. Chem. Biol. 15, 527–532.

● Churchland, C., Grayston, S. J., and Bengtson, P. (2013). Spatial variability of soil fungal and bacterial abundance: consequences for carbon turnover along a transition from a forested to clear-cut site. Soil Biol. Biochem. 63, 5–13.

- Churchland, C., Weatherall, A., Briones, M. J. I., and Grayston, S. J. (2012). Stable-isotope labeling and probing of recent photosynthates into respired CO2, soil microbes and soil mesofauna using a xylem and phloem stem-injection technique on Sitka spruce (Picea sitchensis). Rapid Comm. Mass Spec. 26, 2493–2501.
- Clemmensen, K. E., Bahr, A., Ovaskainen, O., Dahlberg, A., Ekblad, A., Wallander, H., et al. (2013). Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forests. Science 339, 1615–1618.
- Cole, K. M. and R. G. Sheath (1990). Biology of the Red Algae Cambridge University Press. Cambridge: U. K.
- Collignon, C., Uroz, S., Turpault, M. P., and Frey-Klett, P. (2011). Seasons differently impact the structure of mineral weathering bacterial communities in beech and spruce stands. Soil Biol. Biochem. 43, 2012–2022.
- Coupe, H., and Withers, J. (2012). Effect of Microbial Interactions on Pathogen Growth and Survival during Fermentation of Raw Milk–Final Report. Ministry for Primary Industries by Helen Withers and Justine Couper, Ag Research Ltd. 1–66.
- Courty, P. E., Franc, A., Pierrat, J. C., and Garbaye, J. (2008). Temporal changes in the ectomycorrhizal community in two soil horizons of a temperate oak forest. App. Enviro. Microb. 74, 5792–5801.
- Cowan, M. M., Warren, T. M., and Fletcher, M. (1991). Mixed-species colonization of solid surfaces in laboratory biofilms. Biofouling 3, 23–34.
- Cueto, M., Jensen, P. R., Kauffman, C., Fenical, W., Lobkovsky, E., and Clardy, J. (2001). Pestalone, a new antibiotic produced by a marine fungus in response to bacterial challenge. J. Nat. Prod. 64, 1444–1446.

- Cugini, C., Calfee, M. W., Farrow, J. M., Morales, D. K., Pesci, E. C., and Hogan, D. A. (2007). Farnesol, a common sesquiterpene, inhibits PQS production in Pseudomonas aeruginosa. Mol. Microbiol. 65, 896–906.

- Currie, C. R., Scott, J. A., Summerbell, R. C., and Malloch, D. (1999). Fungus-growing ants use antibiotic producing bacteria tocontrol garden parasites. Nature 398, 701–704.

- Czarnes, S., Hallett, P.D., Bengough, A.G. and Young, I.M. (2000). Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. European Journal of Soil Science 51, 435–443.

- Dakora, F., Matiru, V., and Kanu, A. (2015). Rhizosphere ecology of lumichrome and riboflavin, two bacterial signal molecules eliciting developmental changes in plants. Front. Plant Sci. 6:700

- Dalié, D. K. D., Deschamps, A. M., and Richard-Forget, F. (2010). Lactic acid bacteria - Potential for control of mould growth and mycotoxins: a review. Food Control 21, 370–380.

- De Vuyst, L., and Neysens, P. (2005). The sourdough microflora: biodiversity and metabolic interactions. Trends Food Sci. Technol. 16, 43–56.

- Deibel, V., and Schoeni, J. (2003). Biofilms: Forming a Defense Strategy for the Food Plant. Available online at: https://www.foodsafetymagazine.com

- DeWit, P. J. G. M., Mehrabi, R., Van Den Burg, H. A., and Stergiopoulos, I. (2009). Fungal effector proteins: past present and future. Mol. Plant Patho. 10, 735–747.

- Diep, D. B. (2006). Data mining and characterization of a novel pediocin-like bacteriocin system from the genome of Pediococcus pentosaceus ATCC 25745. Microbiology 152, 1649–1659.

- Dixit, R., Agrawal, L., Gupta, S., Kumar, M., Yadav, S., Chauhan, P. S., et al. (2016). Southern blight disease of tomato control by 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase producing Paenibacillus lentimorbus B-30488. Plant Signal. Behav. 11:e1113363.

- Dodd, J. C., Boddington, C. L., Rodriguez, A., Gonzalez-Chavez, V., and Mansur, I. (2000). Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) from different genera: form, function and detection. Plant Soil 226, 131–151.

- Domenech, J., Ramos-Solano, B., Probanza, A., Lucas-Garcia, J.A., Colon, J.J., Gutierrez-Manero, F.J., (2004). Bacillus spp. and Pisolithus tinctorius effects on Quercus ilex ssp. ballota: a study on tree growth, rhizosphere community structure and mycorrhizal infection. Forest Ecology and Management, 194: 293–303.

- Doornbos, R. F., Geraats, B. P., Kuramae, E. E., Van Loon, L. C., and Bakker, P. A. (2011). Effects of jasmonic acid, ethylene, and salicylic acid signaling on the rhizosphere bacterial community of Arabidopsis thaliana. Mol. Plant Microbe Interact. 24, 395–407.

- Douglas, L. J. (2003). Candida biofilms and their role in infection. Trends Microbiol. 11, 30–36.

- Drucker, D. B. (1987). Microbial Applications of HPLC. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

- Duponnois, R., and Kisa, M. (2006). The possible roles of trehalose in the mycorrhiza helper effect. Can. J. Bot. 84, 1005–1008.

- Dyess, D. L., Garrison, R. N., and Fry, D. E. (1985). Candida sepsis. Implications of polymicrobial blood-borne infection. Arch. Surg. 120, 345–348.

- Eisenhauer, S. D., Beßler, H., Engels, C., Gleixner, G., Habekost, H., Milcu, A., et al. (2010). Plant diversity effects on soil microorganisms support the singular hypothesis. Ecology 91, 485–496.

- Elsas, J. D., Trevors, J. T. and Wellington, E. M. (1997) Modern soil microbiology. MARCEL DEKKER, INC. New York.

- Entian, K.-D., and de Vos, W. M. (1996). Genetics of subtilin and nisin biosyntheses. Antonie Van Leeuwenhoek 69, 109–117.

- Epron, D., Bahn, M., Derrien, D., Lattanzi, F. A., Pumpanen, J., Gessler, A., et al. (2012). Pulse-labelling trees to study carbon allocation dynamics: a review of methods, current knowledge and future prospects. Tree Physiol. 32, 776–798.

- Epron, D., Ngao, J., Dannoura, M., Bakker, M. R., Zeller, B., Bazot, S., et al. (2011). Seasonal variation of belowground carbon transfer assessed by in situ (CO2)-C-13 pulse labelling of trees. Biogeosciences 8, 1153–1168.

- Esperschütz, J. A., Gattinger, A., Buegger, F., Lang, H., Munch, J., Schloter, M., et al. (2009). A continuous labelling approach to recover photosynthetically fixed carbon in plant tissue and rhizosphere organisms of young beech trees (Fagus sylvatica L.) using 13C depleted CO2. Plant Soil 323, 21–29.

- Etesami, H., Mirseyed Hosseini, H., and Alikhani, H. A. (2014). Bacterial biosynthesis of 1-aminocyclopropane-1-caboxylate (ACC) deaminase, a useful trait to elongation and endophytic colonization of the roots of rice under constant flooded conditions. Physiol. Mol. Biol. Plants 20, 425–434.

- Evangelou, M. W., and Deram, A. (2014). Phytomanagement: a realistic approach to soil remediating phytotechnologies with new challenges for plant science. Int. J. Plant. Biol. Res. 2:1023.

- Fahad, S., Hussain, S., Bano, A., Saud, S., Hassan, S., Shan, D., et al. (2015). Potential role of phytohormones and plant growth-promoting rhizobacteria in abiotic stresses: consequences for changing environment. Environ. Sci. Pollut. Res. 22, 4907–4921.

● Faith, J. J., McNulty, N. P., Rey, F. E., and Gordon, J. I. (2011). Predicting a human gut microbiota's response to diet in gnotobiotic mice. Science 333, 101–104.

● Faust, K., and Raes, J. (2012). Microbial interactions: from networks to models. Nat. Rev. Microbiol. 10, 538–550.

● Fellbaum, C. R., Gachomo, E. W., Beesetty, Y., Choudhari, S., Strahan, G. D., Pfeffer, P. E., et al. (2012). Carbon availability triggers fungal nitrogen uptake and transport in arbuscular mycorrhizal symbiosis. Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A. 109, 2666–2671.

● Finlay, B.J., Laybourn, J. and Strachan, I. (1979). A technique for the enumeration of benthic ciliated protozoa. Oecologia (Berlin) 39:375-377.

● Fleet, G. (2003). Yeast interactions and wine flavour. Int. J. Food Microbiol. 86, 11–22.

● Fletcher M and Gray T R G (1987) Ecology of Microbial Communities. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

● Forbes B A, Salim D F and Weissfeld (1998) Diagnostic Microbiology, 10th Edn. Mosby.

● Fraenkel H Contrat, Kimball P C Levy Jay A (1988) Virology Prentice Hall Angel wood Cliff, New Jersey.

● Frases, S., Chaskes, S., Dadachova, E., and Casadevall, A. (2006). Induction by Klebsiella aerogenes of a Melanin-Like Pigment in Cryptococcus neoformans. Appl. Environ. Microbiol. 72, 1542–1550.

● Frey-Klett, P., Burlinson, P., Deveau, A., Barret, M., Tarkka, M., and Sarniguet, A. (2011). Bacterial-fungal interactions: hyphens between agricultural, clinical, environmental, and food microbiologists. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 75, 583–609.

● Frey-Klett, P., Garbaye, J., and Tarkka, M. (2007). The mycorrhiza helper bacteria revisited. New Phyt. 176, 22–36.

● Fryxell, G. A. (1983). Survival Strategies of the Algae.Cambridge University Press, Cambridge: U. K.

● Fuqua, C., Parsek, M. R., and Greenberg, E. P. (2001). Regulation of gene expression by cell-to-cell communication: acyl-homoserine lactone quorum sensing. Annu. Rev. Genet. 35, 439–468.

● Gerez, C. L., Torino, M. I., Rollan, G., and de Valdez, G. F. (2009). Prevention of bread mould spoilage by using lactic acid bacteria with antifungal properties. Food Control 20, 144–148.

● Ghosh T K (1990) Bioprocesses, Computation in Biotechnology. Vol.-I; Ellis Harwood NY.

● Gibson, J., Sood, A., and Hogan, D. A. (2009). Pseudomonas aeruginosa-Candida albicans interactions: localization and fungal toxicity of a phenazine derivative. Appl. Environ. Microbiol. 75, 504–513.

● Gobbetti, M., and Corsetti, A. (1997). Lactobacillus sanfranciscoa key sourdough lactic acid bacterium:a review. Food Microbiol. 14, 175–187.

● Gobbetti, M., Corsetti, A., and Rossi, J. (1994). The sourdough microflora. Interactions between lactic acid bacteria and yeasts: metabolism of carbohydrates. Appl. Microbiol. Biotechnol. 41, 456–460.

● Goerges, S., Aigner, U., Silakowski, B., and Scherer, S. (2006). Inhibition of Listeria monocytogenes by food-borne yeasts. Appl. Environ. Microbiol. 72, 313–318.

● Gray, E. J., and Smith, D. L. (2005). Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the plant-bacterium signaling processes. Soil Biol. Biochem. 37, 395–412

● Grayston, S. J., Vaughan, D., and Jones, D. (1997). Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. App. Soil Ecol. 5, 29–56.

● Gregory, P. H. (1973). The microbiology of the atmosphere. John Wiley and Sons, New York.

● Gudlaugsson, O., Gillespie, S., Lee, K., Vande Berg, J., Hu, J., Messer, S., et al. (2003). Attributable Mortality of Nosocomial Candidemia, Revisited. Clin. Infec. Dis. 37, 1172–1177.

● Gunashekaran (2000) The Genetics of Bacteria and their Viruses 2nd Edn. Wiley, NY.

● Gunashekaran (2000) The Microbiology of the Atmosphere. Cambridge Univ. Press. London.

● Gupta, N., Haque, A., Mukhopadhyay, G., Narayan, R. P., and Prasad, R. (2005). Interactions between bacteria and Candida in the burn wound. Burns 31, 375–378.

● Hafeez, F. Y., Abaid-Ullah, M., and Hassan, M. N. (2013). "Plant growth-promoting rhizobacteria as zinc mobilizers: a promising approach for cereals biofortification," in Bacteria in Agrobiology: Crop Productivity, eds D. K. Maheshwari, M. Saraf, and A. Aeron (Berlin: Springer),217–235.

● Harriott, M. M., and Noverr, M. C. (2011). Importance of Candida–bacterial polymicrobial biofilms in disease. Trends Microbiol. 19, 557–563.

● Hassan, T., Bano, A., and Naz, I. (2017). Alleviation of of heavy metals toxicity by the application of plant growth promoting rhizobacteria(PGPR) and effects on wheat grown in saline sodic field. Int. J. Phytoremediat. 19, 522–529.

● Helmholtz-zentrum, M. T., and Res, A. (2016). Environmental and Microbial Relationships, 3rd Edn. Cham: Springer.

- Hentzer, M., Wu, H., Andersen, J. B., Riedel, K., Rasmussen, T. B., Bagge, N., et al. (2003). Attenuation of Pseudomonas aeruginosa virulence by quorum sensing inhibitors. EMBO J. 22, 3803–3815.

- Herbert, R.A. (1982). Procedures for the isolation, cultivation and identification of bacteria. In Burns, R.G. and Slater, J.H (eds.). Experimental Microbial Ecology. Blackwell Scientific Publications. Oxford, England. Pp. 3-21.

- Hermann, C., Hermann, J., Munzel, U., and Ruchel, R. (1999). Bacterial flora accompanying Candida yeasts in clinical specimens. Mycoses 42, 619–627.

- Heydarian, Z., Yu, M., Gruber, M., Glick, B. R., Zhou, R., and Hegedus, D. D. (2016). Inoculation of soil with plant growth promoting bacteria producing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase or expression of the corresponding acds gene in transgenic plants increases salinity tolerance in camelina sativa. Front. Microbiol. 7:1966.

- Hiltner, L. (1904). Über neuere erfahrungen und probleme auf dem debiete der bo denbakteriologie und unter besonderer berucksichtigung der grundund und brache. Zbl. Bakteriol. 2, 14–25.

- Hobbie, J. E., and Hobbie, E. A. (2006). N-15 in symbiotic fungi and plants estimates nitrogen and carbon flux rates in Arctic tundra. Ecology 87, 816–822.

- Hogan, D. A., Vik, Å., and Kolter, R. (2004). A Pseudomonas aeruginosa quorum-sensing molecule influences Candida albicans morphology. Mol. Microbiol. 54, 1212–1223.

- Högberg, M. N., and Högberg, P. (2002). Extramatrical ectomycorrhizal mycelium contributes one-third of microbial biomass and produces, together with associated roots, half the dissolved organic carbon in a forest soil. New Phyt. 154, 791–795.

- Hogenhout, S. A., Van der Hoorn, R. A. L., Terauchi, F., and Kamoun, S. (2009). Emerging concepts in effector biology of plant-associated organisms. Mol. Plant Microbe Interact. 22, 115–122

- Holt T S, Krieq N R, Sneath PHA and Williams S T (1994) Bergey's Manual of Determinative Bacteriology 9th Edn. Williams & Wilkim, Baltimore, MD, USA.

- Hugenschmidt, S., Schwenninger, S. M., and Lacroix, C. (2011). Concurrent high production of natural folate and vitamin B12 using a co-culture process with Lactobacillus plantarum SM39 and Propionibacterium freudenreichii DF13. Process Biochem. 46, 1063–1070.

- Hugenschmidt, S., Schwenninger, S. M., Gnehm, N., and Lacroix, C. (2010). Screening of a natural biodiversity of lactic and propionic acid bacteria for folate and vitamin B12 production in supplemented whey permeate. Int. Dairy J. 20, 852–857.

- Hughes, M. N. and R. K. Poole (1989) Metals and Microorganisms, Chapman & Hall Ltd., London, U.K.

- Hughes, W. T., and Kim, H. K. (1973). Mycoflora in cystic fibrosis: some ecologic aspects of Pseudomonas aeruginosa and Candida albicans. Mycopathol. Mycol. Appl. 50, 261–269.

- Humphrey, T. J. (1994). Contamination of egg shell and contents with Salmonella enteritidis: a review. Int. J. Food Microbiol. 21, 31–40.

- Hyde, A. J., Parisot, J., McNichol, A., and Bonev, B. B. (2006). Nisin-induced changes in Bacillus morphology suggest a paradigm of antibiotic action. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 103, 19896–19901.

- Ibrahim, A. S., Gebremariam, T., Liu, M., Chamilos, G., Kontoyiannis, D., Mink, R., et al. (2008). Bacterial endosymbiosis is widely present among zygomycetes but does not contribute to the pathogenesis of mucormycosis. J. Infect. Dis. 198, 1083–1090.

- Innerebner, G., Knief, C., and Vorholt, J. A. (2011). Protection of Arabidopsis thaliana against leaf-pathogenic Pseudomonas syringae by Sphingomonas strains in a controlled model system. Appl. Environ. Microbiol. 77, 3202–3210.

- Jard, G., Liboz, T., Mathieu, F., Guyonvarc'h, A., and Lebrihi, A. (2011). Review of mycotoxin reduction in food and feed: from prevention in the field to detoxification by adsorption or transformation. Food Addit. Contam. A 28, 1590–1609.

- Jay J M (1987) Modern food Microbiology CBS Pub. & Distributors, New Delhi.

- Jay, J. M. (2000). Modern Food Microbiology, 6th Edn. Gaithersburg, MD: Aspen Publishers, Inc.

- Jeffrey, C. (1983). Kingdoms, Code and Classification.Kew Bull. 37(3): 403 – 416.

- Jenkins, J. R., Viger, M., Arnold, E. C., Harris, Z. M., Ventura, M., Miglietta, F., et al. (2017). Biochar alters the soil microbiome and soil function: results of next-generation amplicon sequencing across Europe. Glob. Chang. Biol. Bioenergy 9, 591–612.

- Jha, C. K., and Saraf, M. (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. E3 J. Agric. Res. Dev. 5, 108–119.

- Jobbágy, E. G., and Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecol. App. 10, 423–436.

- Jones, P.C.T. and Mollison, J.E. (1948). The technique for the quantitative estimation of soil microorganisms. Journal of General Microbiology 2:54-69.

- Juillard, V., Bars, D. L. E., Kunji, E. R. S., Konings, W. I. L. N., Gripon, J., and Richard, J. (1995). Oligopeptides are the main source of nitrogen for

Lactococcus lactis during growth in milk. Appl. Env. Microbiol. 61, 3024–3030.

- Juillard, V., Foucaud, C., Desmazeaud, M., and Richard, J. (1996). Utilisation des sources d'azote du lait par Lactococcus lactis. Le lait. 76, 13–24.

- Kang, S. M., Khan, A. L., Waqas, M., You, Y. H., Hamayun, M., Joo, G. J., et al. (2015). Gibberellin-producing Serratia nematodiphila PEJ1011 ameliorates low temperature stress in Capsicum annuum L. Eur. J. Soil Biol. 68, 85–93.

- Keller, S., Schneider, K., and Suessmuth, R. D. (2006). Structure elucidation of auxofuran, a metabolite involved in stimulating grwoth of fly agaric, produced by the mycorrhiza helper bacterial streptomyces AcH 505. J. Antibiot. 59, 801–803.

- Keshav rehan (1990) Biotechnology, New age international publishers, New Delhi

- Kiprono, S. J., Ullah, M. W., and Yang, G. (2018a). Encapsulation of E. coli in biomimetic and Fe3O4-doped hydrogel: structural and viability analyses. Appl. Microbiol. Biotechnol. 102, 933–944.

- Kiprono, S. J., Ullah, M. W., and Yang, G. (2018b). Surface engineering of microbial cells: strategies and applications. Eng. Sci. 1, 33–45.

- Kloppholz, S., Kuhn, H., and Requena, N. (2011). A secreted fungal effector of Glomus intraradices promotes symbiotic biotrophy. Curr. Biol. 21, 1204–1209.

- Klotz, S. A., Chasin, B. S., Powell, B., Gaur, N. K., and Lipke, P. N. (2007). Polymicrobial bloodstream infections involving Candida species: analysis of patients and review of the literature. Diagn. Microbiol. Infect. Dis. 59, 401–406.

- Kluber, L. A., Tinnesand, K. M., Caldwell, B. A., Dunham, S. M., Yarwood, R. R., Bottomley, P. J., et al. (2010). Ectomycorrhizal mats alter forest soil biogeochemistry. Soil Biol. Biochem. 42, 1607–1613.

- Kumar, A., Bahadur, I., Maurya, B., Raghuwanshi, R., Meena, V., Singh, D., et al. (2015). Does a plant growth promoting rhizobacteria enhance agricultural sustainability. J. Pure Appl. Microbiol. 9, 715–724.

- Kumar, C. G., and Anand, S. K. (1998). Significance of microbial biofilms in food industry: a review. Int. J. food Microbiol. 42, 9–27.

- Kumar, S., Chauhan, P. S., Agrawal, L., Raj, R., Srivastava, A., Gupta, S., et al. (2016). Paenibacillus lentimorbus inoculation enhances tobacco growth and extenuates the virulence of cucumber mosaic virus. PLoS One 11:e0149980.

- Lackner, G., and Hertweck, C. (2011). Impact of endofungal bacteria on infection biology, food safety, and drug development. PLoS Pathog. 7, 5–8.

- Landecker E M (1982) Fundamentals of the Fungi. 2nd Edn. Prentice Hall Inc.

- Leach, J. E., Triplett, L. R., Argueso, C. T., and Trivedi, P. (2017). Communication in the phytobiome. Cell 169, 587–596.

- Lederberg, J. Editor-in-Chief (1992) Encyclopedia of Microbiology, Vol. 1-4, Academic .

- Lee, S. K., Lur, H. S., Lo, K. J., Cheng, K. C., Chuang, C. C., Tang, S. J., et al. (2016). Evaluation of the effects of different liquid inoculant formulations on the survival and plant-growth-promoting efficiency of Rhodopseudomonas palustris strain PS3. Appl. Microbiol. Biotechnol. 100, 7977–7987.

- Lejon, D. P. H., Chausson, R., Ranger, J., and Ramjard, L. (2005). Microbial community structure and density under different tree species in an acid forest soil. Microb. Ecol. 50, 614–625.

- Ley, R. E., Turnbaugh, P. J., Klein, S., and Gordon, J. I. (2006). Human gut microbes associated with obesity. Nature 444, 1022–1023.
- Li, H., Ding, X., Wang, C., Ke, H., Wu, Z., Wang, Y., et al. (2016). Control of tomato yellow leaf curl virus disease by Enterobacter asburiaeBQ9 as a result of priming plant resistance in tomatoes. Turk. J. Biol. 40, 150–159.
- Li, Y. H., and Tian, X. L. (2016). Quorum sensing and bacterial social interactions in biofilms: bacterial cooperation and competition. Stress Environ. Regul. Gene Expr. Adapt. Bact. 2, 1197–1205.
- Liebeke, M., Brozel, V. S., Hecker, M., and Lalk, M. (2009). Chemical characterization of soil extract as growth media for the ecophysiological study of bacteria. Appl. Microb. Biotech. 83, 161–173.
- Lindgren, S. E., and Dobrogosz, W. J. (1990). Antagonistic activities of lactic acid bacteria in food and feed fermentation. Fems Microbiol. Rev. 87, 149–163.
- Lioussanne, L., Perrault, F., Jolicoeur, M., and St-Arnaud, M. (2010). The bacterial community of tomato rhizosphere is modified by inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi but unaffected by soil enrichment with mycorrhizal root exudates or inoculation with Phytophthora nicotianae. Soil Biol. Biochem. 42, 473–483.
- Llorente, B. E., Alasia, M. A., and Larraburu, E. E. (2016). Biofertilization with Azospirillum brasilense improves in vitro culture of Handroanthus ochraceus, a forestry, ornamental and medicinal plant. N. Biotechnol. 33, 32–40.
- Loessner, M., Guenther, S., Steffan, S., and Scherer, S. (2003). A pediocin-producing Lactobacillus plantarum strain inhibits Listeria monocytogenes in a multispecies cheese surface microbial ripening consortium. Appl. Environ. Microbiol. 69, 1854–1857.

- Lopitz-Otsoa, F., Ramenteria, A., Elguezabal, N., and Garaizar, J. (2006). Kefir: a symbiotic yeast-bacteria community with alleged healthy communities. Rev. Iberoam. Micol. 23, 67–74.
- Loss, C., and Hotchkiss, J. (2001). Inhibition of Microbial Growth by Low-Pressure and Ambient Pressure Gases. New York, NY: Marcel Dekker.
- Lowe, R. G. T., and Howlett, B. J. (2012). Indifferent, affectionate or deceitful: lifestyles and secretomes of fungi. PLoS Pathog. 8:e1002515.
- Lowery, A. C., Dickerson, J. T., and Janda, K. (2008). Interspecies and interkingdom communication mediated by bacterial quorum sensing. Chem. Soc. Rev. 39, 1337–1346.
- Lundberg, D. S., Lebeis, S. L., Paredes, S. H., Yourstone, S., Gehring, J., Malfatti, S., et al. (2012). Defining the core Arabidopsis thaliana root microbiome. Nature 488, 86–90.
- Lynch, J. M., Hobbie, J. E. (1988).Micro-organisms in action: concepts and applications in microbial ecology. Blackwell Scientific Publications. UK.
- Mah, T. F., Pitts, B., Pellock, B., Walker, G. C., Stewart, P. S., and O'toole, G. A. (2003). A genetic basis for Pseudomonas aeruginosa biofilm antibiotic resistance. Nature 426, 306–310.
- Maloy, K. J., and Powrie, F. (2011). Intestinal homeostasis and its breakdown in inflammatory bowel disease. Nature 474, 298–306.
- Margulis, L. (1971). Whittaker's Five Kingdoms of Organisms: Minor Revisions Suggested by Consideration of the Origin of Mitosis. Evolution 25: 242 – 245.
- Margulis, L. (1974). Five Kingdom Classification and the Origin and Evolution of Cells. Evol. Biol. 7: 45 – 78.

- Margulis, L., J. O. Corliss, M. Melkonian and D. J. Chapman (1990). Handbok of Protoctista. Jones &Barlett, Boston: U. S. A

- Márquez, L. M., Redman, R. S., Rodriguez, R. J., and Roossinck, M. J. (2007). A virus in a fungus in a plant: three-way symbiosis required for thermal tolerance. Science 315, 513–516.

- Marroquí, S., Zorreguieta, A., Santamarí, A. C., Temprano, F., Soberón, M., Megías, M., et al. (2001). Enhanced symbiotic performance by Rhizobium tropici glycogen synthase mutants. J. Bacteriol. 183, 854–864.

- Marsh, P. D. (1994). Microbial ecology of dental plaque and its significance in health and disease. Adv. Dent. Res. 8, 263–271.

- Marsh, P. D. (2003). Are dental diseases examples of ecological catastrophes? Microbiology 149, 279–294.

- Marshall K C (1985) Advances in Microbial Ecology Vol.8 Plenum Press.

- Martin, F., Kohler, A., and Duplessis, S. (2007). Living in harmony in the wood underground: ectomycorrhizal genomics. Curr. Opin. Plant Biol. 10, 204–210. doi: 10.1016/j.pbi.2007.01.006

- Massalha, H., Korenblum, E., Tholl, D., and Aharoni, A. (2017). Small molecules below-ground: the role of specialized metabolites in the rhizosphere. Plant J. 90, 788–807.

- McAlester, G., O'Gara, F., and Morrissey, J. P. (2008). Signal-mediated interactions between Pseudomonas aeruginosa and Candida albicans. J. Med. Microbiol. 57, 563–569.

- Medema, M. H., and Fischbach, M. A. (2015). Computational approaches to natural product discovery. Nat. Chem. Biol. 11, 639–648.

- Meharg, A. A. (2003). The mechanistic basis of interactions between mycorrhizal associations and toxic metal cations. Mycol. Res. 107, 1253–1265.

- Mehnaz, S. (2016). “An overview of globally available bioformulations,” in Bioformulations: For Sustainable Agriculture, eds N. K. Arora, S. Mehnaz, and R. Balestrini (Berlin: Springer), 267–281.
- Meier, I. C., Avids, P. G., and Phillips, R. P. (2013). Fungal communities influence root exudation rates in pine seedlings. FEMS Microb. Ecol. 83, 585–595.
- Miller, M. B., and Bassler, B. L. (2001). Quorum sensing in bacteria. Annu. Rev. Microbiol. 55, 165–199.
- Mohd, M. A., and Ahmad, I. (2014). “A novel strain of Pseudomonas fluorescens WS1 Forms biofilm on root surface and enhances growth of wheat plant,” in 2nd International Conference on Agricultural & Horticultural Sciences, Hyderabad.
- Morales, D. K., Jacobs, N. J., Rajamani, S., Krishnamurthy, M., Cubillos-Ruiz, J. R., and Hogan, D. A. (2010). Antifungal mechanisms by which a novel Pseudomonas aeruginosa phenazine toxin kills Candida albicans in biofilms. Mol. Microbiol. 78, 1379–1392.
- Moree, W. J., Phelan, V. V., Wu, C. H., Bandeira, N., Cornett, D. S., Duggan, B. M., et al. (2012). Interkingdom metabolic transformations captured by microbial imaging mass spectrometry. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 109, 13811–13816.
- Morrissey, J. P., Dow, J. M., Mark, G. L., and O’Gara, F. (2004). Are microbes at the root of a solution to world food production? Rational exploitation of interactions between microbes and plants can help to transform agriculture. EMBO Rep. 5, 922–926.
- Mossel, D. A. A. (1995). Essentials of the Microbiology of Foods: A Textbook for Advanced Studies. Chichester, UK: J. Wiley.
- Mounier, J. (2008). Microbial interactions within a cheese microbial community. Appl. Environ. Microbiol. 74, 172–181.

- Mounier, J., Gelsomino, R., Goerges, S., Vancanneyt, M., Vandemeulebroecke, K., Hoste, B., et al. (2005). Surface microflora of four smear-ripened cheeses. Appl. Environ. Microbiol. 71, 6489–6500.

- Nadeem, S. M., Imran, M., Naveed, M., Khan, M. Y., Ahmad, M., Zahir, Z. A., et al. (2017). Synergistic use of biochar, compost and plant growth-promoting rhizobacteria for enhancing cucumber growth under water deficit conditions. J. Sci. Food Agric. 97, 5139–5145.

- Nakatsuji, T., Chen, T. H., Butcher, A. M., Trzoss, L. L., Nam, S., Shirakawa, K. T., et al. (2018). A commensal strain of Staphylococcus epidermidis protects against skin neoplasia. Sci. Adv. 4:eaao4502.

- Nazir, R., Warmink, J. A., Boersma, H., and van Elsas, J. D. (2010). Mechanisms that promote bacterial fitness in fungal-affected soil microhabitats. FEMS Microb. Ecol. 71, 169–185.

- Nehls, U., Gohringer, F., Wittulsky, S., and Dietz, S. (2010). Fungal carbohydrate support in the ectomycorrhizal symbiosis: a review. Plant Biol. 12, 292–301.

- Niu, D.-D., Zheng, Y., Zheng, L., Jiang, C.-H., Zhou, D.-M., and Guo, J.-H. (2016). Application of PSX biocontrol preparation confers root-knot nematode management and increased fruit quality in tomato under field conditions. Biocontrol Sci. Technol. 26, 174–180.

- Nosheen, A., Bano, A., and Ullah, F. (2016a). Bioinoculants: a sustainable approach to maximize the yield of Ethiopian mustard (Brassica carinata L.) under low input of chemical fertilizers. Toxicol. Ind. Health 32, 270–277.

- Nosheen, A., Bano, A., Yasmin, H., Keyani, R., Habib, R., Shah, S. T., et al. (2016b). Protein quantity and quality of safflower seed improved by NP fertilizer and Rhizobacteria (Azospirillum and Azotobacter spp.). Front. Plant Sci. 7:104.

- Nseir, S., Jozefowicz, E., Cavestri, B., Sendid, B., Di Pompeo, C., Dewavrin, F., et al. (2007). Impact of antifungal treatment on Candida–Pseudomonas interaction: a preliminary retrospective case–control study. Intensive Care Med. 33, 137–142.

- Oh, D. C., Kauffman, C. A., Jensen, P. R., and Fenical, W. (2007). Induced production of emericellamides A and B from the marine-derived fungus Emericella sp in competing co-culture. J. Nat. Prod. 70, 515–520.

- Oh, D.-C., Jensen, P. R., Kauffman, C. A., and Fenical, W. (2005). Libertellenones A–D: induction of cytotoxic diterpenoid biosynthesis by marine microbial competition. Bioorg. Med. Chem. 13, 5267–5273.

- Oke, V., and Long, S. R. (1999). Bacteroid formation in the Rhizobium–legume symbiosis. Curr. Opin. Microbiol. 2, 641–646.

- Oladipo, O. G., Awotoye, O. O., Olayinka, A., Bezuidenhout, C. C., and Maboeta, M. S. (2018). Heavy metal tolerance traits of filamentous fungi isolated from gold and gemstone mining sites. Brazilian J. Microbiol. 49, 29–37.

- O'Toole, G. A., and Kolter, R. (1998a). Flagellar and twitching motility are necessary for Pseudomonas aeruginosa biofilm development. Mol. Microbiol. 30, 295–304.

- O'Toole, G. A., and Kolter, R. (1998b). Initiation of biofilm formation in Pseudomonas fluorescens WCS365 proceeds via multiple, convergent signalling pathways: a genetic analysis. Mol. Microbiol. 28, 449–461.

- Pandey, S. N. and P. S. Trivedi (1994). A Textbook of Botany (10. Edition). Vikas Publishing House , New Delhi: India.

- Panuccio, M. R., Sorgonà, A., Rizzo, M., and Cacco, G. (2009). Cadmium adsorption on vermiculite, zeolite and pumice: batch experimental studies. J. Environ. Manage. 90, 364–374.

- Parkinson, D. (1982). Procedures for the isolation, cultivation and identification of fungi. In Burns, R.G. and Slater, J.H (eds.). Experimental Microbial Ecology. Blackwell Scientific Publications. Oxford, England. Pp. 22-30.

- Parkinson, D., Gray, T.R.G. and Williams, S.T. (1971). Methods for Studying the Ecology of soil.

- Partida-Martinez, L. P., Groth, I., Schmitt, I., Richter, W., Roth, M., and Hertweck, C. (2007). Burkholderia rhizoxinica sp. nov. and Burkholderia endofungorum sp. nov., bacterial endosymbionts of the plant-pathogenic fungus Rhizopus microsporous. Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 57, 2583–2590.

- Paul, E H and Clark F E (1989) Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press, London and NY.

- E.A. (2007). Soil microbiology, ecology, and biochemistry. ,Paul Academic Press, Elsevier, UK.

- Pawlowska, T. E., and Charvat, I. (2004). Heavy-Metal Stress and Developmental Patterns of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Heavy-Metal Stress and Developmental Patterns of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. Appl. Environ. Microbiol. 70, 6643–6649.

- Pelczar M J, Chan E C S and Kreig N R (1993) Microbiology, Mc Graw Hill Inl. New York.

- Peleg, A. Y., Hogan, D. A., and Mylonakis, E. (2010). Medically important bacterial–fungal interactions. Nat. Rev. Microbiol. 8, 340–349.

- Pettipher, G.L. and Rodrigues, U.M. (1982). Semi-automated counting of bacteria and somatic cells in milk using epifluorescence microscopy and television image analysis. Journal of Applied Bacteriology 53:323-329.

- Pettit, R. K. (2009). Mixed fermentation for natural product drug discovery. Appl. Microbiol. Biotechnol. 83, 19–25

- Phillips, R. P., Erlitz, Y., Bier, R., and Bernhardt, E. S. (2008). New approach for capturing soluble root exudate in forest soils. Func. Ecol. 22, 990–999.

- Phillips, R. P., Finzi, A. C., and Bernhardt, E. S. (2011). Enhanced root exudation induces microbial feedbacks to N cycling in a pine forest under long-term CO2 fumigation. Ecol. Lett.14, 1887–1894.

- Pieterse, C. M., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C., and Bakker, P. A. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. Annu. Rev. Phytopathol. 52, 347–375.

- Ping, L., and Boland, W. (2004). Signals from the underground: bacterial volatiles promote growth in Arabidopsis. Trends Plant Sci. 9, 263–266.

- Pivato, B., Offre, P., Marchelli, S., Barbonaglia, B., Mougel, C., Lemanceau, P., et al. (2009). Bacterial effects on arbuscular mycorrhizal fungi and mycorrhiza development as influenced by the bacteria, fungi, and host plant. Mycorrhiza 19, 81–90.

- Plett, J. M., Kemppainen, M., Kale, S. D., Kohler, A., Legue, V., Brun, A., et al. (2011). A secreted effector protein of Laccaria Bicolor is required for symbiosis development. Curr. Biol. 21, 1197–1203.

- Podila, G. K., Sreedasyam, A., and Muratet, M. A. (2009). Populus rhizosphere and the ectomycorrhizal interactome. Crit. Rev. Plant Sci. 28, 359–367.

- Prashar, P., Kapoor, N., and Sachdeva, S. (2013). “Biocontrol of plant pathogens using plant growth promoting bacteria,” in Sustainable Agriculture Reviews, ed. E. Lichtfouse (Berlin: Springer), 319–360.

- Prescott L M, Harley J P and Klein D A (1990) Microbiology Wm-C Brown Pub. USA

- Presscott L M, Harley J P and Klein D A (1999) Microbiology, International Edn. 4th Edn. WCB Mc Graw-Hill.

- Primrose, S.B., Seeley, N.D. and Logan, K.B. (1982). Methods for the study of virus ecology. In Burns, R.G. and Slater, J.H (eds.). Experimental Microbial Ecology. Blackwell Scientific Publications. Oxford, England. Pp. 66-83.

- Pritchard, S. G., Strand, A. E., McCormack, M. L., Davis, M. A., Finzi, A. C., Jackson, R. B., et al. (2008b). Fine root dynamics in a loblolly pine forest are influenced by Free-Air-CO2-Enrichment (FACE): a six year minirhizotron study. Glob Change Biol. 7, 829–837.

- Prudent, M., Salon, C., Souleimanov, A., Emery, R. J. N., and Smith, D. L. (2015). Soybean is less impacted by water stress using Bradyrhizobium japonicum and thuricin-17 from Bacillus thuringiensis. Agron. Sustain. Dev. 35, 749–757.

- Qu, L. Y., Shinano, T., Quoresji, A. M., Tamai, Y., Osaki, M., and Koike, T. (2004). Allocation of 14C carbon in two species of larch seedlings infected with ectomycorrhizal fungi. Tree Physiol. 24, 1369–1376.

- Quiza, L., St-Arnaud, M., and Yergeau, E. (2015). Harnessing phytomicrobiome signaling for rhizosphere microbiome engineering. Front. Plant Sci. 6:507.

- Raaijmakers, J. M., Vlami, M., and de Souza, J. T. (2002). Antibiotic production by bacterial biocontrol agents. Antonie Van Leeuwenhoek 81, 537–547.

- Ramey, B. E., Koutsoudis, M., Von Bodman, S. B., and Fuqua, C. (2004). Biofilm formation in plant-microbe associations. Curr. Opin. Microbiol. 7, 602–609.

Reed G (1982) Industrial Microbiology. Mac Millan Pub. Ltd. Wisconsin. ●

- Reynolds, H. L., Hartley, A. E., Vogelsang, K. M., Bever, J. D., and Schultz, P. A. (2005). Arbuscular mycorrhizal fungi do not enhance nitrogen acquisition and growth of old-field perennials under low nitrogen supply in glasshouse culture. New Phyt. 167, 869–880.

● Ricci, E. C. (2015). Investigating the Role of Pseudomonas sp. and Bacillus sp. Biofilms as Plant Growth Promoting Inoculants. Master's thesis, McGill University, Montreal, QC.

● Riedlinger, J., Schrey, S. D., Tarkka, M. T., Hampp, R., Kapur, M., and Fiedler, H. P. (2006). Auxofuran, a novel substance stimulating growth of fly agaric produced by the mycorrhiza helper bacteria Streptomycetes AcH 505. App. Enviro. Micro. 72, 3550–3557.

● Rijavec, T., and Lapanje, A. (2016). Hydrogen cyanide in the rhizosphere: not suppressing plant pathogens, but rather regulating availability of phosphate. Front. Microbiol. 7:1785.

● Röling, W. F. M., Schuurmans, F. P., Timotius, K. H., Stouthamer, A. H., and Van Verseveld, H. W. (1994a). Influence of prebrining treatments on microbial and biochemical changes during the baceman stage in Indonesian kecap (soy sauce) production. J. Ferment. Bioeng. 77, 400–406.

● Röling, W. F. M., Timotius, K. H., Stouthamer, A. H., Verseveld, V., and Henk, W. (1994b). Physical factors influencing microbial interactions and biochemical changes during the Baceman stage of Indonesian Kecap (soy sauce) production. J. Ferment. Bioeng. 77, 293–300.

● Ronney, P. D., Kraigsley, A., and Finkel, S. E. (2004). Hydrodynamic Effects on Biofilm Formation. Available online at: http://carambola.usc.edu/research/biophysics/Biofilms4Web.html

● Rose, A. H. and J. S. Harrison (1987-1988) The Yeasts, 2nd Edition, Vol.1 -2, Academic Press, New York, U.S.A.

● Round, F. E. (1984). The Ecology of the algae. Cambridge University Press. New York.

- Rouse, S., Harnett, D., Vaughan, A., and van Sinderen, D. (2008). Lactic acid bacteria with potential to eliminate fungal spoilage in foods. J. Appl. Microbiol. 104, 915–923.

- Rubin, R. L., Van Groenigen, K. J., and Hungate, B. A. (2017). Plant growth promoting rhizobacteria are more effective under drought: a meta-analysis. Plant Soil 416, 309–323.

- Ruzzi, M., and Aroca, R. (2015). Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture. Sci. Hortic. 196, 124–134.

- Ryan, L. A. M., Zannini, E., Dal Bello, F., Pawlowska, A., Koehler, P., and Arendt, E. K. (2011). Lactobacillus amylovorus DSM 19280 as a novel food-grade antifungal agent for bakery products. Int. J. Food Microbiol. 146, 276–283.

- Schaechter M, Medoff G, and Eisenstein B C (1993) Mechanism of Microbial disease. 2nd Edn. Williams and Wilkins Baltimore.

- Scherlach, K., and Hertweck, C. (2009). Scherlach, K. and Hertweck, C. Triggering cryptic natural product biosynthesis in microorganisms. Org. Biomol. Chem. 7, 1753–1760.

- Scherlach, K., Graupner, K., and Hertweck, C. (2013). Molecular bacteria-fungi interactions: effects on environment, food, and medicine. Annu. Rev. Microbiol. 67, 375–397.

- Schink, B. (2002). Synergistic interactions in the microbial world. Antonie Van Leeuwenhoek 81, 257–261.

- Schlegal H G (1993) General Microbiology Cambridge Univ. Press. Cambridge CB-2 2RU, UK.

- Schroeckh, V., Scherlach, K., Nutzmann, H.-W., Shelest, E., Schmidt-Heck, W., Schuemann, J., et al. (2009). Intimate bacterial-fungal interaction triggers biosynthesis of archetypal polyketides in Aspergillus nidulans. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 106, 14558–14563.

- Shakeri, E., Modarres-Sanavy, S. A. M., Amini Dehaghi, M., Tabatabaei, S. A., and Moradi-Ghahderijani, M. (2016). Improvement of yield, yield components and oil quality in sesame (Sesamum indicum L.) by N-fixing bacteria fertilizers and urea. Arch. Agron. Soil Sci. 62, 547–560.

- Sheth, E. C., and Taga, M. E. (2017). Nutrient cross-feeding in the microbial world. Front. Microbiol. 5:350.

- Shi, S. J., O'Callaghan, M., Jones, E. E., Richardson, A. E., Walter, A., Stewart, A., et al. (2012). Investigation of organic anions in tree root exudates and rhizosphere microbial communities using in situ and destructive sampling techniques. Plant Soil 359, 149–163.

- Shi, Z., Shi, X., Ullah, M. W., Li, S., Revin, V. R., and Yang, G. (2018). Fabrication of nanocomposites and hybrid materials using microbial biotemplates. Adv. Compos. Hybrid Mater. 1, 79–93.

- Shirtliff, M. E., Peters, B. M., and Jabra-Rizk, M. A. (2009). Cross-kingdom interactions: Candida albicans and bacteria. FEMS Microbiol. Lett. 299, 1–8.

- Sieracki M. E., Johnson, P.W. and Sieburth, J.M (1985). Detection, enumeration and sizing of planktonic bacteria by image analyzed epifluorescence microscopy. Applied and Environmental Microbiology 49: 799-810.

- Sieuwerts, S., De Bok, F. A. M., Hugenholtz, J., and Van Hylckama Vlieg, J. E. T. (2008). Unraveling microbial interactions in food fermentations: from classical to genomics approaches. Appl. Environ. Microbiol. 74, 4997–5007.

- Smith, D. L., Gravel, V., and Yergeau, E. (2017). Editorial: signaling in the phytomicrobiome. Front. Plant Sci. 8:611.

- Smith, S. E., and Read, D. J. (2008). Mycorrhizal Symbiosis. New York, NY: Academic Press.

- Spaepen, S., and Vanderleyden, J. (2011). Auxin and plant-microbe interactions. Cold Spring Harb. Perspect. Biol. 3:a001438.

- Spaepen, S., Bossuyt, S., Engelen, K., Marchal, K., and Vanderleyden, J. (2014). Phenotypical and molecular responses of Arabidopsis thaliana roots as a result of inoculation with the auxin-producing bacterium Azospirillum brasilense. New Phytol. 201, 850–861. doi: 10.1111/nph.12590

- Srivastava, S., Bist, V., Srivastava, S., Singh, P. C., Trivedi, P. K., Asif, M. H., et al. (2016). Unraveling aspects of Bacillus amyloliquefaciens mediated enhanced production of rice under biotic stress of Rhizoctonia solani. Front. Plant Sci. 7:587.

- Staddon, P. L., Ramsey, C. B., Ostle, N., Ineson, P., and Fitter, A. H. (2003). Rapid turnover of hyphae of mycorrhizal fungi determined by AMS microanalysis of C-14. Science 300, 1138–1140.

- Stainer R Y, Ingraha, J L, Wheelis M L and Painter P K (1986) General Microbiology Mc Millan Edun. Ltd. London.

- Stern, K. R. (2000). Introductory Plant Biology (8. Edition). Mc Grow-Hill Companies, London: U. K.

- Sturino, J. M., and Klaenhammer, T. R. (2006). Engineered bacteriophage-defence systems in bioprocessing. Nat. Rev. Microbiol. 4, 395–404.

- Subbarao, N S (1981) Soil Microorganisms and Plant Growth. Oxford and IBH Pub. Co. New Delhi.

- Subramanian, P., Mageswari, A., Kim, K., Lee, Y., and Sa, T. (2015). Psychrotolerant endophytic Pseudomonas sp strains OB155 and OS261 induced chilling resistance in tomato plants (Solanum lycopersicum mill.) by activation of their antioxidant capacity. Mol. Plant Microbe Interact. 28, 1073–1081.

● Subramanian, S., Ricci, E., Souleimanov, A., and Smith, D. L. (2016a). A proteomic approach to lipo-chitooligosaccharide and thuricin 17 effects on soybean germination unstressed and salt stress. PLoS One 11:e0160660.

● Subramanian, S., Souleimanov, A., and Smith, D. L. (2016b). Proteomic studies on the effects of lipo-chitooligosaccharide and thuricin 17 under unstressed and salt stressed conditions in Arabidopsis thaliana. Front. Plant Sci. 7:1314. doi: 10.3389/fpls.2016.01314

● Sullia.S.B (2000) General Microbiology, Oxford and IBH Pub. Co. New Delhi.

● Sun, J., Daniel, R., Wagner-Döbler, I., and Zeng, A. P. (2004). Is autoinducer-2 a universal signal for interspecies communication: a comparative genomic and phylogenetic analysis of the synthesis and signal transduction pathways. BMC Evol. Biol. 4:36.

● Takishita, Y., Charron, J., and Smith, D. L. (2018). (Pseudomonas Entomophila 23S, a PGPR with Potential for Control of Bacterial Canker Disease in Tomato (Solanum lycopersicum L.) Against Clavibacter Michiganensis Subsp. Michiganensis. Doctoral thesis, McGill University, Montreal, QC.

● Talbot, J. M., Allison, S. D., and Treseder, K. K. (2008). Decomposers in disguise: mycorrhizal fungi as regulators of soil C dynamics in ecosystems under global change. Func. Ecol. 22, 955–963.

Taurop (1997) An introduction to Microbiology, New age international Ltd, New Delhi●

Taylor, A. F. S., and Alexander, I. (2005). The ecotomycorrhizal symbiosis: life in the real world. Mycologist 19, 102–112.

● Teplitski, M., Robinson, J. B., and Bauer, W. D. (2000). Plants secrete substances that mimic bacterial N-acyl homoserine lactone signal activities and affect population density-dependent behaviors in associated bacteria. Mol. Plant Microbe Interact. 13, 637–648.

- Teusink, B., Wiersma, A., Molenaar, D., Francke, C., De Vos, W., Siezen, R., et al. (2007). Analysis of Growth of Lactobacillus plantarum WCFS1 on a Complex Medium Using a Genome-scale Metabolic Model. J. Biolol. Chem. 281, 40041–40048.

- Tiwari, S., and Lata, C. (2018). Heavy metal stress, signaling, and tolerance due to plant-associated microbes: an overview. Front. Plant Sci. 9:452.

- Tiwari, S., Lata, C., Chauhan, P. S., and Nautiyal, C. S. (2016). Pseudomonas putida attunes morphophysiological, biochemical and molecular responses in Cicer arietinum L. during drought stress and recovery. Plant Physiol. Biochem. 99, 108–117

- Toju, H., Peay, K. G., Yamamichi, M., Narisawa, K., Hiruma, K., Naito, K., et al. (2018). Core microbiomes for sustainable agroecosystems. Nat. Plants 4, 247–257.

- Treseder, K. K., Allen, M. F., Ruess, R. W., Pregitzer, K. S., and Hendrick, R. L. (2005). Lifespans of fungal rhizomorphs under nitrogen fertilization in a pinyon-juniper woodland. Plant Soil 270, 249–255.

- Tshikantwa, T. S., Gashe, B., and Mpuchane, A. S. F. (2017). The effect of Cloeme gynandra (“Rotho”) extract, temperature and pH on attachment and biofilm formation by Escherichia coli 11229, Bacillus cereus ATCC 11778 and Pseudomonas aeruginosa ANCIMB 8295 on stainless steel. Eur. Acad. Int. Multi. Res. J. IV, 10350–10399.

- Ul-Islam, M., Ullah, M. W., Khan, S., Kamal, T., Ul-Islam, S., Shah, N., et al. (2016). Recent advancement in cellulose based nanocomposite for addressing environmental challenges. Recent Pat. Nanotechnol. 10, 169–180.

- Ullah, M. W., Islam, M. U., Khan, S., Shah, N., and Park, J. K. (2017a). Recent advancements in bioreactions of cellular and cell-free systems: a study of bacterial cellulose as a model. Korean J. Chem. Eng. 34, 1591–1599.

- Ullah, M. W., Khattak, W. A., Ul-Islam, M., Khan, S., and Park, J. K. (2014). Bio-ethanol production through simultaneous saccharification and fermentation using an encapsulated reconstituted cell-free enzyme system. Biochem. Eng. J. 91, 110–119.

- Ullah, M. W., Khattak, W. A., Ul-Islam, M., Khan, S., and Park, J. K. (2015a). Encapsulated yeast cell-free system: a strategy for cost-effective and sustainable production of bio-ethanol in consecutive batches. Biotechnol. Bioprocess Eng. 20, 561–575.

- Ullah, M. W., Shi, Z., Shi, X., Zeng, D., Li, S., and Yang, G. (2017b). Microbes as structural templates in biofabrication: study of surface chemistry and applications. ACS Sustain. Chem. Eng. 5, 11163–11175.

- Ullah, M. W., Ul-Islam, M., Khan, S., Kim, Y., and Park, J. K. (2015b). Innovative production of bio-cellulose using a cell-free system derived from a single cell line. Carbohydr. Polym. 132, 286–294.

- Ullah, M. W., Ul-Islam, M., Khan, S., Kim, Y., and Park, J. K. (2016). Structural and physico-mechanical characterization of bio-cellulose produced by a cell-free system. Carbohydr. Polym. 136, 908–916.

- Valerio, F., Favilla, M., De Bellis, P., Sisto, A., de Candia, S., and Lavermicocca, P. (2009). Antifungal activity of strains of lactic acid bacteria isolated from a semolina ecosystem against Penicillium roqueforti, Aspergillus niger and Endomyces fibuliger contaminating bakery products. Syst. Appl. Microbiol. 32, 438–448.

- Van den Hoek,Ch. , H. M. Jahns and D. G. Mann (1993). Algen (3. Edition). Thieme Verlag, Stuttgart: Germany.

- Vecstaudza, D., Senkovs, M., Nikolajeva, V., Kasparinskis, R., and Muter, O. (2017). Wooden biochar as a carrier for endophytic isolates. Rhizosphere 3, 126–127.

- Velivelli, S. L., De Vos, P., Kromann, P., Declerck, S., and Prestwich, B. D. (2014). Biological control agents: from field to market, problems, and challenges. Trends Biotechnol. 32, 493–496.

- Verstraete, W. (2007). "Microbial ecology and environmental biotechnology". International Society for Microbial Ecology Journal. ISME J. 1 (1): 4–8.

- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. Plant Soil 255, 571–586.

- Viljoen, B. C. (2001). The interaction between yeasts and bacteria in dairy environments. Int. J. Food Microbiol. 69, 37–44.

- Wainwright, M., Al-Falih, A. M., (1996). Involvement of Yeasts in Urea Hydrolysis and Nitrification in Soil Amended with a Natural Source of Succharose. Mycological Research.100 (3): 307-310.

- Wallander, H. (2006). "Mineral dissolution by ectomycorrhizal fungi," in Fungi in Biogeochemical Cycles, ed G. M. Gadd ed (Cambridge: Cambridge University Press), 28–50.

- Walsh, U. F., Morrissey, J. P., and O'Gara, F. (2001). Pseudomonas for biocontrol of phytopathogens: from functional genomics to commercial exploitation. Curr. Opin. Biotechnol. 12, 289–295.

- Wang, L. H., He, Y., Gao, Y., Wu, J. E., Dong, Y. H., He, C., et al. (2004). A bacterial cell-cell communication signal with cross-kingdom structural analogues. Mol. Microbiol. 51, 903–912.

- Wang, Q. Y., Dodd, I. C., Belimov, A. A., and Jiang, F. (2016). Rhizosphere bacteria containing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase increase growth and photosynthesis of pea plants under salt stress by limiting Na+ accumulation. Funct. Plant Biol. 43, 161–172.

- Wang, Y. Y., Jing, X. R., Li, L. L., Liu, W. J., Tong, Z. H., and Jiang, H. (2017). Biotoxicity evaluations of three typical biochars using a simulated system of fast pyrolytic

- Wani, P.A., Khan, M.S., and Zaidi, A. (2007). Chromium Reduction, Plant Growth–Promoting Potentials, and Metal Solubilizatrion by Bacillus sp. Isolated from Alluvial Soil. Current Microbiology, 54 (3): 237-243.

- Ward O P (1989) Fermentation Biotechnology; Principles, Processes and Products. Prentice Hall Engle Wood Cliffs New Jersey.

- Watnick, P., and Kolter, R. (2000). Biofilm, city of microbes. J. Bacteriol. 182, 2675–2679.

- Welc, M., Bunemann, E. K., Fliessbach, A., Frossard, E., and Jansa, J. (2012). Soil bacterial and fungal communities along a soil chronosequence assessed by fatty acid profiling. Soil Biol. Biochem. 49, 184–192.

- Werner, J. J., Knights, D., Garcia, M. L., Scalfone, N. B., Smith, S., Yarasheski, K., et al. (2011). Bacterial community structures are unique and resilient in full-scale bioenergy systems. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 108, 4158–4163.

- West, S. A., and Buckling, A. (2003). Cooperation, virulence and siderophore production in bacterial parasites. Proc. R. Soc. B Biol. Sci. 270, 37–44.

- West, S. A., Griffin, A. S., Gardner, A., and Diggle, S. P. (2006). Social evolution theory for microorganisms. Nat. Rev. Microbiol. 4, 597–607.

- Whiteside, M. D., Digman, M. A., Gratton, E., and Treseder, K. K. (2012). Organic nitrogen uptake by arbuscular mycorrhizal fungi in a boreal forest. Soil Biol. Biochem. 55, 7–13.

- Whittaker, R. H. (1969). New Concepts of Kingdoms of Organisms. Science 163: 150 – 160.
- Wiedemann, I., Böttiger, T., Bonelli, R. R., Schneider, T., Sahl, H. G., and Martínez, B. (2006). Lipid II-based antimicrobial activity of the lantibiotic .plantaricin C. Appl. Environ. Microbiol. 72, 2809–2814
- Willsey, T., Chatterton, S., and Cárcamo, H. (2017). Interactions of root-feeding insects with fungal and oomycete plant pathogens. Front. Plant Sci. 8:1764.
- Winter, J. M., and Behnken, S. H. C. (2011). Genomics-inspired discovery of natural products. Curr. Opin. Chem. Biol. 15, 22–31.
- Wistriech G A and Lechtman M D (1988) Microbiology, 5th Edn. Mac. Millan Pub. Co. NY.
- Wu, B., Nara, K., and Hogetsu, T. (2002). Spatiotemporal transfer of carbon-14-labelled photosynthate from ectomycorrhizal Pinus densiflora seedlings to extraradical mycelia. Mycorrhiza 12, 83–88.
- Xiong, T., Leveque, T., Shahid, M., Foucault, Y., Mombo, S., and Dumat, C. (2014). Lead and cadmium phytoavailability and human bioaccessibility for vegetables exposed to soil or atmospheric pollution by process ultrafine particles. J. Env. Quality. 43, 1593–1600.
- Yokotsuka, T. (1986). Soy sauce biochemistry. Adv. Food Res. 30, 195–329.
- Zaccaria, M., Dedrick, S., and Momeni, B. (2017). Modeling microbial communities: a call for collaboration between experimentalists and theorists. Processes 5:53.
- Zebelo, S., Song, Y., Kloepper, J. W., and Fadamiro, H. (2016). Rhizobacteria activates (+)-delta-cadinene synthase genes and induces systemic resistance in cotton against beet armyworm (Spodoptera exigua). Plant Cell Environ. 39, 935–943.

- Zengler, K. (2009). Central Role of the Cell in Microbial Ecology. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 73: 712-729

- Zhang, R., Vivanco, J. M., and Shen, Q. (2017). The unseen rhizosphere root-soil-microbe interactions for crop production. Curr. Opin. Microbiol. 37, 8–14.

- Zhou, C., Ma, Z. Y., Zhu, L., Xiao, X., Xie, Y., Zhu, J., et al. (2016). Rhizobacterial strain Bacillus megaterium bofc15 induces cellular polyamine changes that improve plant growth and drought resistance. Int. J. Mol. Sci. 17:976.

- Zipfel, C., and Oldroyd, G. E. (2017). Plant signalling in symbiosis and immunity. Nature 543, 328–336.

كشاف المصطلحات العلمية
Index

أولًا: عربي - أجنبي

أ

أبواغ أسيدية	Aecidiospores
أبواغ تيليتية	Teleutospores
أبواغ خارجية	Exospores
أبواغ داخلية	Endospores
أبواغ ساكنة (أكينيتات)	Akinetes
أبواغ كلاميدية	Clamydospores
أبواغ مختزلة	Meiospores
أبواغ يوريدية	Urediospores
إبيكون	Epicone
أتروبين	Atropine
أجاثيس (جنس)	Agathis
آجار	Agar
أجسام باراميلونية	Paramylon bodies

أحادي المجموعة الصبغية	(Haploid (1n
أركيوباكتيريا	Archaebacteria
أروكاريا (جنس)	Araucaria
أروكاريا هيتروفيلا	Araucaria heterophylla
ازهرار مائي	Water-blooms
آزوتوباكتر (جنس)	Azotobacter
آزوسبيريللوم فولوتانس	Azospirillum volutans
آزولا (جنس)	Azolla
أسبرجيللس (جنس)	Aspergillus
أستريونيللا (جنس)	Asterionella
أستريونيللا فورموزا	Asterionella formosa
أسكوجونة	Ascogonium
أسواط	Flagella
أسيتابولاريا (جنس)	Acetabularia
أشعة فوق بنفسجية	Ultra violet (UV)
أشنات	Lichens
أشنات خيطية	Filamentose lichens
أشنات شجرية	Fruticose lichens

أشنات قشرية	Crustose lichens
أشنات ورقية	Foliose lichens
أشيلا (جنس)	Achyla
أعشاب بحرية	Phytobentose
أغشـية ثايلاكويدية	Thylakoid membrans
أفانوكابسا (جنس)	Aphanocapsa
أفانوكابسا بولكارا	Aphanocapsa pulchara
أفانيزومينن (جنس)	Aphanizomenen
إفرنيا بروناستري	Evernia prunastri
أفلاتوكسين	Aflatoxine
أفيب (جنس)	Ephebe
إكتوكاربوس (جنس)	Ectocarpus
إكتوكاربوس سيليسولوزس	Ectocarpus siliculosus
أكتيـن	Actine
أكروسيفونيا (جنس)	Acrosiphonia
أكروسيمفيتون (جنس)	Acrosymphyton
أكروسيمفيتون بوربورفيروم	Acrosymphyton purpuriferum

ألبوجو كانديدا	Albugo candida
ألترناريا (جنس)	Alternaria
التهاب الكبد	Hepatitis infection
ألجينات	Algins
أللوفيكوسيانين	Allophycocyanin
أمانيتا (جنس)	Amanita
أمانيتا موسكاريا	Amanita muscaria
أمشاج (جاميتات)	Gametes
أمشاج متشابهة	Isogametes
أمشاج متغايرة	Heterogametes
أميلوبكتين	Amylopectin
أميلوز	Amylose
أنثوسيروس (جنس)	Anthoceros
أهداب	Pili
أودوجونيم (جنس)	Oedogonium
أودونيلا أنفستنس	Audouinella investiens
أوعية بكنية	Pycnidia
أوكروموناس (جنس)	Ochromomnas

أوكروموناس توبركولاتس	Ochromomnas tuberculatus
أوكسوسبور	Auxospore
أولفا (جنس)	Ulva
أولفا فاسياتا	Ulva fasciata
أولفا لاكتوكا	Ulva lactuca
أيـدز (نقص المناعة المكتسبة)	Aids
إيزيدات	Isidia
إيشريشيا كولي	Escherichia coli
إيكويستم جيجانتم	Equisetum gigantum
أتراكتومورفا (جنس)	Atractomorpha
إجباري التطفل	Obligatory parasite
اقتران (تزاوج) بكتيري	Bacterial conjugation
أكتينوميستس	Actinomycetes
إنترفيرون	Interferon
إنتروتوكسين	Enterotoxin
إنتروكوكس فيساليس	Enterococcus faecalis
إنترومورفا (جنس)	Enteromorpha

انشطار ثنائي	Binary fission
أوسيلاتوريا (جنس)	Oscillatoria
إيبرس (جنس)	Iberis
إيزوايتـس (جنس)	Isoetes

ب

باتيولين	Patuline
باراميلون	Paramylon
بارميليا (جنس)	Parmelia
باسيللس (جنس)	Bacillus
باسيللس أنتراكسيس	Bacillus anthracis
باسيللس بريفيس 45	Bacillus brevis
باسيللس سابتيليس	Bacillus subtilis
باكتيريوفيريدين	Bacterioviridin
باكتيريوكلوروفيل	Bacteriochlorophyll
باكسينيا (جنس)	Puccinia
باكسينيا جرامينيس	Puccinia garminis
بالعات	Phagocystis
باندورينا (جنس)	Pandorina

بتروكلاديا (جنس)	Pterocladia
بتريديوم (جنس)	Pteridium
بثرات	Sori
بثرات تيليتية	Teleutosori
بحر السارجاسو	Sargasso sea
بدائيات النوى (الأوليات)	Prokaryotes
بروتين السيانوفيسين	Cyanopheceen-protein
بروتين الفلاجيللين	Flagellin
بروتينات هيستونية	Histone proteins
بروسيلا (جنس)	Brucella
بروسيلا ابورتوس	Brucella abortus
بري بري	Berberis vulgaris
بريبلاست	Periplast
بسيدوكفيرون (جنس)	Pseudokephyron
بسيدوموناس دينتريفيكانس	Pseudomonas denitrificans
بطاطا (بطاطس)	Solanum tuberosum
بقعة عينية	Eye spot

بكتيريا	Bacteria
بكتيريا أرجوانية كبريتية	Purple sulphur bacteria
بكتيريا العقد الجذرية	Nodule bacteria
بكتيريا خضراء مزرقة	Cyanobacteria
بكتيريا ذاتية التغذية	Autotrophic bacteria
بكتيريا سالبة جرام	Gram-negative bacteria
بكتيريا عصوية	Bacilli
بكتيريا عصوية ثنائية	Diplobacillus
بكتيريا عصوية منفردة	Monobacillus
بكتيريا غير ذاتية التغذية	Heterotrophic bacteria
بكتيريا كروية ثمانية	Sarcina
بكتيريا كروية رباعية	Tetracoccus
بكتيريا كروية	Cocci
بكتيريا كروية ثنائية	Diplococcus
بكتيريا كروية سبحية	Streptococcus
بكتيريا كروية عنقودية	Staphylococcus
بكتيريا كروية منفردة	Monococcus
بكتيريا لاهوائية إجباريًّا	Obligate anaerobic

bacteria	
Spirilli	بكتيريا لولبية
Spirochetes	بكتيريا لولبية منثنية
Vibrio	بكتيريا لولبية واوية
Iron bacteria	بكتيريا مؤكسدة للحديد
Sulphur bacteria	بكتيريا مؤكسدة للكبريت
Nitrat bacteria	بكتيريا مؤكسدة للنترات
Nitrifying bacteria	بكتيريا مؤكسدة للنيتروجين
Nitrit bacteria	بكتيريا مؤكسدة للنتريت
Saprophytic bacteria	بكتيريا مترممة
Parasitic bacteria	بكتيريا متطفلة
Psychrophiles	بكتيريا محبة للبرودة
Thermophiles	بكتيريا محبة للحرارة
Pathogenic	بكتيريا ممرضة
Gram-positive bacteria	بكتيريا موجبة جرام
bacteria Obligate aerobic	بكتيريا هوائية إجباريًّا
Fcultative aerobic bacteria	بكتيريا هوائية اختياريًّا

بكتيريا وسطية الحرارة	Mesophiles
بكتين	Pectin
بكتينيز	Pectinase
بلازموبارا فيتيكولا	Plasmopara viticula
بلاستيدات خضراء	Chloroplasts
بلزمة	Plasmolysis
بلعمة	Phagocyctosis
بناء ضوئي	Photosynthesis
بناء كيميائي	Chemosynthesis
بندورة (طماطم)	Lycopersicum esculentum
بنيسيللين	Penicillin
بنيسيليوم	Penicillum
بوتريكيوم (جنس)	Botrychium
بوتريكيوم بيترناتوم	Botrychium biternatum
بودو كاربوس (جنس)	Podocarpus
بورفيرا (جنس)	Porphyra
بورفيرا تنرا	Porphyra tenera

بورفيريديوم (جنس)	Porphyridium
بورفيريديوم بوربوروم	Porphyridium purpureum
بوريلا (جنس)	Porella
بوريلا بلاتيفلويدي	platyphylloidea Porella
بوغة (جرثومة)	Spore
بوغة بازيدية	Basidiospore
بوغة بيضية	Oospore
بوغة زقية	Ascospore
بوغة زيجوتية	Zygospore
بوغة كونيدية	Conidiaspore
بوليبوديوم (جنس)	Polypodium
بوليتريكوم (جنس)	Polytrichum
بوليسيفونيا (جنس)	Polysiphonia
بونيا (جنس)	Bowenia
بويضات	Ovules
بيدولفيا أوريتا	Biddulphia aurita
بيدياستروم (جنس)	Pediastrum
بيرونويد	Pyrenoid

بيريدينين	Peridinin
بيريدينيوم سينستم	Peridinium cinctum
بيضة ملقحة	Zygote
بيلادونيا (ست الحسن)	Atropa belladona
بيلارجونيم (جنس)	Pelargonium
بيليبروتينات	Biliproteins
بينولاريا (جنس)	Pinnularia
بينولاريا فيريديس	Pinnularia viridis

ت

تآزت (نترزة)	Nitrification
تابللاريا (جنس)	Tabellaria
تبرعم	Budding
تبـغ (جنس)	Nicotiana
تبغ تاباكوم	Nicotiana tabacum
تبوغ (تجرثم)	Sporulation
تتراسيكلين	Tetracycline
تخمير	Fermentation
تراما	Trama

ترايكوثوكسين	Trichothoxine
تريبونيما باليدوم	Treponema pallidum
تريبونيما فيريدي	Tribonema viride
تريسيراتيوم (جنس)	Triceratium
تريسيراتيوم ديستينكتوم	Triceratium distinctum
تريشوفيتون (جنس)	Trichophyton
تريكوجين	Trichogyne
تريكوم	Trichom
ترينتبوليا (جنس)	Trentepohlia
تزاوج بيضي	Oogamy
تزاوج جانبي	Lateral conjugation
تزاوج سلمي	Scalariform conjugation
تسمية ثنائية	Binomial nomenclature
تصنيف الممالك الخمس	Five kingdoms classification
تصنيف نباتي	Plant Taxonomy
تضاعف فيروسي	Replication of Viruses
تعاقب بيولوجي	Biological succession

تقسيم جيفري	Jeffrey’s classification

ث

ثالوكريسيس (جنس)	Thallochrysis
ثايلاكويدات	Thylakoids
ثنائي المجموعة الصبغية	(Diploid (2n
ثيوباسيللس (جنس)	Thiobacillus
ثيوتريكس (جنس)	Thiothrix
ثيوسبيريللوم (جنس)	Thiospirillum

ج

جالاكتان	Galactan
جالاكتورونيك	Galacturonic acid
جالوتريكس (جنس)	Galothrix
جانيا (جنس)	Jania
جانيا أدهيرنس	Jania adhaerens
جدري	Small pox
جراسيلاريا (جنس)	Gracilaria
جراميسيدين	Gramicidine
جسم ثمري	Fruit-body

جسم ثمري بازيدي	Basidiocarp
جسيمات حالّة	Lysosomes
جلوكوببتيدات	Peptidoglycans
جلوكورونيك	Glucuronic acid
جليكوبروتين	Glycoprotein
جليكوجين	Glycogen
جلينوديниوم (جنس)	Glenodinium
جهاز جولجي	Golgi apparatus
جونياولاكس (جنس)	Gonyaulax
جونيموكارب	Gonimocarp
جيليديوم (جنس)	Gelidium

ح

حامل	Seta
حصبة	Maesles
حقيقيات النوى	Eukaryotes
حمض الجولورون	Guloron acid
حمض الستريك	Cetric acid
حمض الفيوزاريك	Fusaric acid

حمض المانورون	Mannuron acid
حمض الميوراميك	Muramic acid
حمض نووي رايبوزي	Ribo nucleic acid (RNA)
حمض نووي رايبوزي منقوص الأوكسجين	Desoxy ribo nucleic acid (DNA)
حمى صفراء	Yellow fever
حوامل بازيدية	Basidia
حوامل كونيدية	Conidiophores
حويصلات متغايرة	Heterocysts

خ

خميرة (جنس)	Saccharomyces

د

دياتومات مركزية	Diatomae centrales
دياتومات مستطيلة	Diatomae pennales
ديبلوكوكس نيومونيا	Diplococcus pneumoniae
دينوبريون (جنس)	Dinobryon
ديون (جنس)	Dioon
ديون كاليفانوا	Dioon califanoi

ذ

ذاتيات التغذية	Autotrophs
ذاتية التغذية ضوئيًّا	Photoautotrophic
ذاتية التغذية كيميائيًّا	Chemoautotrophic

ر

رئد	Stolon
رافي (شق طولي)	Raphe
رايبوزومات	Ribosomes
رايزوبيوم (جنس)	Rhizobium
رباعية بوغية	Tetrasporangium
ريكتسيا	Rickettsia
ريكتسيا برواتسكي	Rickettsia prowazekii
ريكتسيا ريكتسي	Rickettsia rickettsi

ز

زانتوفيلات	Xanthophylls
زانتوموناس أورايزي	Xanthomonas oryzae
زانتوموناس سيتري	Xanthomonas citri
زايلان	Xylan
زق	Ascus

زيازانتين	Zeaxanthin
زيجنيما (جنس)	Zygnema

س

سابروليجنيا (جنس)	Saprolegnia
سارجاسم (جنس)	Sargassum
سارجاسم باسيفيروم	Sargassum bacciferum
سارسينا لوتيا	Sarcina lutea
ساكسيتوكسين	Saxitoxin
سالفينيا (جنس)	Salvinia
سالفينيا مولستا	Salvinia molesta
سالمونيلا (جنس)	Salmonella
سبرمات	Spermatia
سبيروجيرا (جنس)	Spirogyra
سبيرولينا (جنس)	Spirulina
سبيريللوزانتين	Spirilloxanthin
سبيريللوم (جنس)	Spirillum
سبيريللوم سربنس	Spirillum serpens
ستافيلوكوكس أوروس	Staphylococcus auerus

Cetraria islandica	ستراريا إيسلانديكا
Streptomyces	ستربتوميسس (جنس)
Streptomyces aureofaciens	ستربتوميسس أوروفاسينس
Streptomyces lincolnensis	ستربتوميسس لينكوليننسيس
Streptococcus pyogenes	ستريبتوكوكس بيوجينس
Streptococcus pneumoniae	ستريبتوكوكس نيومونيا
Sterecaulon	ستريكولون (جنس)
Stigonema	ستيجونيما (جنس)
Stigonema ocellatum	ستيجونيما أوسيلاتوم
Sterols	ستيرولات
Stichosiphon	ستيكوسيفون (جنس)
Stylites	ستيليتس (جنس)
Exotoxins	سموم خارجية
Endotoxins	سموم داخلية
Centroplasm	سنتروبلازم
Soredia	سوريدات
Monopolar	سوطية الطرف
Bipolar	سوطية الطرفين

سيانوتيس اوروجينا	Cyanothece aerugina
سيتونيما (جنس)	Scytonema
سيراتيا (جنس)	Serratia
سيراتيوم (جنس)	Ceratium
سيراتيوم هيرندينيلا	Ceratium hirundinella
سيستوكوكس (جنس)	Cystococcus
سليلوز	Cellulose
سليوليز	Cellulase
سيلوتم (جنس)	Psilotum
سيلوكايبين	Psilocybin
سيلوكيب (جنس)	Psilocybe
سيلوكيب سيانيسنز	Psilocybe cyanescence
سيلوكين	Psilocin
سيليكا	Silica
سينديزمس (جنس)	Scenedesmus
سينورا (جنس)	Synura

ش

شبكة سيتوبلازمية داخلية	Endoplasimc reticulum

شلل الأطفال	Poliomyelitis
شيجيلا (جنس)	Shigella

ص

صباغ الكريستال البنفسجي	Crystal violet stain
صبغ أزرق فيكتوريا	Victoria blue stain
صبغ الصفرانين	Safranin stain
صبغة جرام	Gram stain
صفائح خيشومية	Gills

ط

طاعون الدجاج	Fewl plague
طبقة تحت خصبة	Sub-hymenium
طبقة خصبة	Hymenium
طحالب	Algae = Phycophyta
طحالب أنبوبية	Siphonale algae
طحالب أولفية	Ulvophyceae
طحالب بنية	Brown algae= Phaeophyceae
طحالب بيرية	Pyrrophyta=Dinophyta
طحالب حمراء	Red algae= Rhodophyta

طحالب حمراء بانجية	Bangiophyceae
طحالب حمراء فلوريدية	Florideophyceae
طحالب حمراء كورالينية	Corallinales
طحالب خضراء	Green algae= Chlorophyta = Chlorophyceae
طحالب خضراء مزرقة	Blue-green algae
طحالب دياتومية	Diatomae = Bacillariophyceae
طحالب ذهبية	Chrysophytes
طحالب زيجنيمية	Zygnematophyceae
طحالب صفراء	Xanthophyceae
طحالب كارية	Charophyta = Charophyceae
طحالب متغايرة الأسواط	Heterokontophyta
طحالب هابتوفيتا	Haptophyta
طحالب يوجلينية	Euglenophyta
طور أسيدي	Aecidio stage
طور بازيدي	Basidio stage
طور بالميللي	Palmella stage
طور بكني	Pycnio stage

طور تيليتي	Teleuto stage
طور يوريدي	Uredio stage
طوق	Annulus

ع

عفن أسود (جنس)	Mucor
عفن الخبز	Rhizopus stolonifer
علم البكتيريا	Bacteriology
علم الوراثة	Genetics
علم الوراثة الجزيئية	Molecular genetics
عوالق نباتيـة	Phytoplankton
عيش الغراب (جنس)	Agaricus

غ

غزل فطري (ميسيليوم)	Mycelium
غير ذاتية التغذية	Heterotrophs

ف

فجوة عصارية	Vacoule
فروباسيللس (جنس)	Ferrobacillus
فصيلة	Family

فطريات	Fungi = Mycophyta
فطريات بازيدية (دعامية)	Basidiomycetes
فطريات بلاسمودية	Plasmodiophoromycota
فطريات بيضية	Oomycetes = Oomycota
فطريات زقية (أسكية، كيسية)	Ascomycetes (Ascomycota)
فطريات زيجوتية	Zygomycetes (Zygomycota)
فطريات كتيريدية	Chytridiomycota
فطريات مترممة	Saprophytic fungi
فطريات متطفلة	Parasitic fungi
فطريات متكافلة	Symbiotic fungi
فطريات ناقصة	Deuteromycetes = Deuteromycota
فطور جذرية	Mycorrhiza
فوشيريا (جنس)	Vaucheria
فوشيريا زانتين	Vaucheriaxanthine
فولفوكس (جنس)	Volvox
فوليوتين	Volutin
فيبريو (جنس)	Vibrio

فيتوفثورا إنفستانس	Phytophthora infestans
فيرتيسليوم (جنس)	Verticilium
فيروس أدينو	Adino virus
فيروس آكل البكتيريا	Bacteriophage
فيروس بوليوما	Polyoma virus
فيروسـات	Viruses
فيروسات ضارية	Virulent phages
فيروسات معتدلة	Temperate phages
فيريـون	Virion
فيكو إريثرين	Phycoerytherin
فيكوبيليزومات	Phycobilisomes
فيكوبيلينات	Phycobilins
فيكوزانتين	Fucoxanthin
فيكوسيانين	Phycocyanin
فيوزاريوم (جنس)	Fusarium
فيوزاريوم سولاني	Fusarium solani
فيوسيروس (جنس)	Phaeoceros
فيوكس (جنس)	Fucus

فيوكس فيسيكيولوزس	Fucus vesiculosus
فيوكودان	Fucodan
فيوكوسيراتن	Fucoserraten

ق

قلنسوة	Calyptera
قمح (جنس)	Triticum
قناة اقتران	Conjugation canal

ك

كؤوس أسيدية	Aecidia
كارا (جنس)	Chara
كاراجين	Carrageen
كاربوجونات	Carpogonia
كاربوسبور	Carpospore
كارتيريا (جنس)	Carteria
كاروتينات	Carotenoids
كروداكتيلون راموزوم	Chroodactylon ramosum
كروكوكس (جنس)	Chroococcus
كروكوكس تورجيدس	Chroococcus turgidus

كروماتوبلازم	Chromatoplasm
كروماتين بكتيري	Bacterial chromatin
كروماتيوم (جنس)	Chromatium
كروموسومات	Chromosoms
كريزولامينارين	Chrysolaminarin
كلادونيا (جنس)	Cladonia
كلادونيا رانجيفيرا	Cladonia rangifera
كلامس (جنس)	Calamus
كلاميدوموناس (جنس)	Chlamydomonas
كلبس	Kelps
كلوروسيتيس كوني	Chlorocystis cohnii
كلوروسيستس (جنس)	Chlorocystis
كلوروكوكم (جنس)	Chlorococcum
كلوروميزون أجيل	Chloromeson agile
كلوريلا (جنس)	Chlorella
كلوريلا إلليبسيويدس	Chlorella ellipsioides
كلوستريديوم (جنس)	Clostridium
كلوستريديوم تيتاني	Clostriduim tetani

كلوستريديوم شانفي	Clostridium chanvei
كلوستريوم (جنس)	Closterium
كلوستريوم مونيليفيروم	Closterium moniliferum
كمأة	Truffles
كوبرنسيا (جنس)	Copernicia
كوتلريا (جنس)	Cutleria
كوديوم (جنس)	Codium
كورينباكتيريوم ديفتيريا	Corynebacterium diphtheriae
كوزماريوم (جنس)	Cosmarium
كوزماريوم بوتريتيس	Cosmarium botrytis
كوسينوديسكوس (جنس)	Coscinodiscus
كوسينوديسكوس بانتوسكي	Coscinodiscus pantocseki
كوليرا	Vibrio cholera
كوليرا الخنازير	Pig cholera
كوليفاج	Coliphage
كوندروس كريسبوس	Chondrus crispus
كونيديا	Conidia

كيتوسيراس (جنس)	Chaetoceras
كيتوسيراس كاستراكاني	Chaetoceras castracanei
كيتين	Chitin
كيس جنيني	Embryo sac

ل

لاميناريا (جنس)	Laminaria
لاميناريا سكارينا	Laminaria saccharina
لامينارين	Laminarine
لاينجبا (جنس)	Lyngba
لوجيونيللا نوموفيلا	Logionella pneumophila
ليبتوتريكس (جنس)	Leptothrix
ليزاريا فولبينا	Letharia vulpina
ليسيديا (جنس)	Lecidea
ليكنورا (جنس)	Lecnora
ليكوبوديوم (جنس)	Lycopodium
ليكوبوديوم دندروإيدم	Lycopodium dendroideum
ليكوبوديوم كلافاتوم	Lycopodium clavatum
ليكوبوديوم لوسيدولم	Lycopodium lucidulum

ليكوموفورا (جنس)	Licomophora
ليكوموفورا فلابيلاتي	Licomophora flabellate
لينكوميسين	Lincomycine

م

ماستوكاربوس ستيلاتوس	Mastocarpus stellatus
ماكروسيتس (جنس)	Macrocystis
ماكروسيتس بيريفيرا	Macrocystis pyrifera
مانان	Mannan
مانيتول	Mannitol
متساوي الأمشاج	Isogamy
متعدد الجنس	Polygamous
متغاير الأبواغ	Heterosporous
متغايرة الأمشاج	Anisogamy
متماثل الأبواغ	Homosporous
متورق	Frond
مثانات هوائية	Air bladders
محيطية الأسواط	Peritrichous
مد أحمر	Red tides

Coenocyte	مدمج خلوي
Anthrax	مرض الجمرة الخبيثة
Typhus fever	مرض الحمى التيفوسية
Typhoid fever	مرض الحمى التيفية
Brucellosis	مرض الحمى المالطية
Diphtheria	مرض الدفتيريا (الخناق)
Fusarium wilting	مرض الذبول الفيوزاريومي
Syphilis	مرض الزهري
Tuberculosis	مرض السل الرئوي (الدرن)
Gonorrhoea	مرض السيلان
White rust of crucifers	مرض الصدأ الأبيض للنباتات الصليبية
Tetanus	مرض الكزار (التيتانوس)
Rocky Mountain fever	مرض حمى الجبال الصخرية
Pleuropneumonia	مرض ذات الجنب
Pneumonia	مرض ذات الرئة
Tobacco mosaic disease	مرض فسيفساء (تبرقش) التبغ
Citrus canker	مرض قرحة الليمون
Leaf-trace bundles	مسارات الحزم الورقية

Photoreceptor	مستقبل للضوء
Floral diagram	مسقط زهري
Corymb	مشطية
Placenta	مشيمة
Hypotheca	مصراع سفلي
Epitheca	مصراع علوي
Antibiotics	مضادات حيوية
Diainfectans	مطهرات
Temperature quotion	معامل حراري
Suspensor	معلق (خلية حاملة الجنين)
Symbiosis	معيشة تكافلية
Spindle	مغزل
Fiddelhead	ملوى (ورقة سرخسية فتية)
Kingdom: Monera	مملكة الأوليات
Kingdom: Animalia	مملكة الحيوان
Kingdom: Protista	مملكة الطلائعيات
Kingdom: Fungi	مملكة الفطريات
Kingdom: Plantae	مملكة النبات (النباتات)

مملكـة	Kingdom
منحنى النمو البكتيري	Bacterial growth curve
ميريسموبيديا (جنس)	Merismopedia
ميريسموبيديا بونكتاتا	Merismopedia punctata
ميزوزومات	Mesosomes
ميكروسست (جنس)	Microcystis
ميكروسست أروجينوزا	Microcystis aeruginosa
ميكوباكتيريوم تيبركولوسيس	Mycobacterium tuberculosis
ميكوبلازما	Mycoplasma
ميكوبلازما سالفيفاريوم	Mycoplasma salvivarium
ميكوبلازما فارينجز	Mycoplasma pharynges
ميكوبلازما فيرنتانس	Mycoplasma ferentans
ميكوبلازما ميكوبلازما	Mycoplasma mycoplasma
ميكوبلازما نيومونيا	Mycoplasma pneumonia
ميكوبلازما هومينيس	Mycoplasma hominis
مينيوم (جنس)	Minium
ميوزين	Myosine

ن

نافيكولا (جنس)	Navicula
نافيكولا أوبلونجا	Navicula oblonga
نتروباكتر (جنس)	Nitrobacter
نتروزوموناس (جنس)	Nitrosomonas
نشا السيانوفيسين	Cyanopheceen starch
نشا فلورايدي	Floridean starch
نفاذية اختيارية	Semi-permeable
نكـاف	Mumps
نواة	Nucleus
نوتيلوكا سينتيلانس	Notiluca scintillans
نوستوك (جنس)	Nostoc
نوستوك بيسينال	Nostoc piscinale
نوستوك كوليما	Nostoc collema
نوع	Species
نوكارديا (جنس)	Nocardia
نيريوسيتس (جنس)	

Nereocystis	
نيسيريا جونوريا	Neisseria gonorrhoeae
نيكليوتيدات	Nucleotides
نيماتودا	Nimatodes
نيوساكسيتوكسين	Neosaxitoxin

ه

هالوباكتيريوم (جنس)	Halobacterium
هرموجونات	Hormogones
هيبوكون	Hypocone
هيترو زانتين	Heteroxanthine
هيفا	Hypha
هيمانتاليا لورا	Himanthalia lorea

و

وستيلا إنتريكاتا	Westiella intricata

ي

يخضور (كلوروفيل)	Chlorophyll
يوكابسيس (جنس)	Eucapsis
يوجلينا (جنس)	Euglena
يوروميسين	Euromycine

ثانيًا: أجنبي - عربي

A

أشيلا (جنس)	Achyla
أكروسيفونيا (جنس)	Acrosiphonia
أكروسيمفيتون (جنس)	Acrosymphyton
أكتينوميستس	Actinomycetes
كزبرة البئر (جنس)	Adiantum
فيروس أدينو	Adino virus
كؤوس أسيدية	Aecidia
طور أسيدي	Aecidio stage
أبواغ أسيدية	Aecidiospores
أفلاتوكسين	Aflatoxine
آجار	Agar
عيش الغراب (جنس)	Agaricus
أجاثيس (جنس)	Agathis
الأيـدز (نقص المناعة المكتسبة)	Aids
مثانات هوائية	Air bladders

أبواغ ساكنة (أكينيتات)	Akinetes
البوجو كانديدا	Albugo candida
طحالب	Algae = Phycophyta
ألجينات	Algins
أللوفيكوسيانين	Allophycocyanin
ألترناريا (جنس)	Alternaria
أمانيتا (جنس)	Amanita
أمانيتا موسكاريا	Amanita muscaria
أميلوبكتين	Amylopectin
أميلوز	Amylose
أنابينا فلوزاكوا	Anabaena flosaquae
مرض الجمرة الخبيثة	Anthrax
مضادات حيوية	Antibiotics
أفانيزومينن (جنس)	Aphanizomenen
أفانوكابسا (جنس)	Aphanocapsa
أفانوكابسا بولكارا	Aphanocapsa pulchara
أركيوباكتيريا	Archaebacteria
أسكوجونة	Ascogonium

Ascomycetes (Ascomycota)	فطريات زقية (أسكية، كيسية)
Ascophyllum nodosum	أسكوفيللوم نودوزوم
Ascospore	بوغة زقية
Ascus	زق
Aspergillus	أسبرجيللس (جنس)
Asterionella	أستريونيلا (جنس)
Asterionella formosa	أستريونيلا فورموزا
Atractomorpha	أتراكتومورفا (جنس)
Atropa belladona	بيلادونيا (ست الحسن)
Atropine	أتروبـين
Audouinella investiens	أودونيلا إنفستنس
Autotrophic bacteria	بكتيريا ذاتية التغذية
Autotrophs	ذاتيات التغذية
Auxins	أوكسينات
Auxospore	أوكسوسبور
Azolla	آزولا (جنس)
Azospirillum volutans	آزوسبيريللوم فولوتانس

Azotobacter	آزوتوباكتر (جنس)

B

Bacilli	بكتيريا عصوية
Bacillus	باسيللس (جنس)
Bacillus anthracis	باسيللس أنتراكسيس
Bacillus brevis	باسيللس بريفيس
Bacillus subtilis	باسيللس سابتيليس
Bacteria	بكتيريا
Bacterial chromatin	كروماتين بكتيري
Bacterial conjugation	اقتران (تزاوج) بكتيري
Bacterial growth curve	منحنى النمو البكتيري
Bacteriochlorophyll	باكتيريوكلوروفيل
Bacteriology	علم البكتيريا
Bacteriophage	فيروس آكل البكتيريا
Bacterioviridin	باكتيريوفيريدين
Bangiophyceae	طحالب حمراء بانجية
Basidia	حوامل بازيدية
Basidio stage	طور بازيدي

جسم ثمري بازيدي	Basidiocarp
فطريات بازيدية (دعامية)	Basidiomycetes
بوغة بازيدية	Basidiospore
بري بري	Berberis vulgaris
بيدولفيا أوريتا	Biddulphia aurita
بيليبروتينات	Biliproteins
انشطار ثنائي	Binary fission
تسمية ثنائية	Binomial nomenclature
تعاقب بيولوجي	Biological succession
سوطية الطرفين	Bipolar
طحالب خضراء مزرقة	Blue-green algae
طحالب بنية	Brown algae= Phaeophyceae
بروسيلا (جنس)	Brucella
بروسيلا أبورتوس	Brucella abortus
مرض الحمى المالطية	Brucellosis
تبرعم	Budding

C

قلنسوة	Calyptera

كابسيد	Capsid
كبسولة (علبة)	Capsule
كاروتينات	Carotenoids
كاربوجونات	Carpogonia
كاربوسبور	Carpospore
كاراجين	Carrageen
سليوليز	Cellulase
سليلوز	Cellulose
سنتروبلازم	Centroplasm
سيراتيوم (جنس)	Ceratium
سيراتيوم هيرندينيلا	Ceratium hirundinella
ستراريا إيسلانديكا	Cetraria islandica
حمض الستريك	Cetric acid
كيتوسيراس (جنس)	Chaetoceras
كيتوسيراس كاستراكاني	Chaetoceras castracanei
كارا (جنس)	Chara
طحالب كارية	Charophyta = Charophyceae

Chemoautotrophic	ذاتية التغذية كيميائيًّا
Chemosynthesis	بناء كيميائي
Chitin	كيتين
Chlamydomonas	كلاميدوموناس (جنس)
Chlorella ellipsioides	كلوريلا إلليبسيويدس
Chloromeson agile	كلوروميزون أجيل
Chlorophyll	يخضور (كلوروفيل)
Chloroplasts	بلاستيدات خضراء
Chondrus crispus	كوندروس كريسبوس
Chromatium	كروماتيوم (جنس)
Chromatophores	حوامل الأصباغ
Chromatoplasm	كروماتوبلازم
Chromosoms	كروموسومات
Chroococcus	كروكوكس (جنس)
Chroococcus turgidus	كروكوكس تورجيدس
Chroodactylon ramosum	كروداكتيلون راموزوم
Chrysolaminarin	كريزولامينارين
Chrysophytes	طحالب ذهبية

Chytridiomycota	فطريات كتيريدية
Citrus canker	مرض قرحة الليمون
Cladonia	كلادونيا (جنس)
Cladonia rangifera	كلادونيا رانجيفيرا
Clamydospores	أبواغ كلاميدية
Closterium	كلوستريوم (جنس)
Closterium moniliferum	كلوستريوم مونيليفيروم
Clostridium	كلوستريديوم (جنس)
Clostridium chanvei	كلوستريديوم شانفي
Clostriduim tetani	كلوستريديوم تيتاني
Cocci	بكتيريا كروية
Coenocyte	مدمج خلوي
Coliphage	كوليفاج
Columella	عويميد
Conidia	كونيديا
Conidiaspore	بوغة كونيدية
Conidiophores	حوامل كونيدية
Coral reefs	شعاب مرجانية

Corallinales	طحالب حمراء كورالينية
Corynebacterium diphtheriae	كورينباكتيريوم ديفتيريا
Coscinodiscus	كوسينوديسكوس (جنس)
Coscinodiscus pantocseki	كوسينوديسكوس بانتوسكي
Crustose lichens	أشنات قشرية
Crystal violet stain	صباغ الكريستال البنفسجي
Cutleria	كوتلريا (جنس)
Cyanobacteria	بكتيريا خضراء مزرقة
Cyanopheceen starch	نشا السيانوفيسين
Cyanopheceen-protein	بروتين السيانوفيسين
Cyanothece aerugina	سيانوتيس اوروجينا

D

Dactylella	داكتيليلا (جنس)
Desoxy ribo nucleic acid (DNA)	حمض نووي رايبوزي منقوص الأوكسجين
Deuteromycetes = Deuteromycota	فطريات ناقصة
Diainfectans	مطهرات
Diatomae =	طحالب دياتومية

Bacillariophyceae	
Diatomae centrales	دياتومات مركزية
Diatomae pennales	دياتومات مستطيلة
Dinobryon	دينوبريون (جنس)
Diphtheria	مرض الدفتيريا (الخناق)
Diplobacillus	بكتيريا عصوية ثنائية
Diplococcus	بكتيريا كروية ثنائية
Diplococcus pneumoniae	ديبلوكوكس نيومونيا
Diploid (2n)	ثنائي المجموعة الصبغية
Division	قسم

E

Ectocarpus	إكتوكاربوس (جنس)
Ectocarpus siliculosus	إكتوكاربوس سيليسولوزس
Endoplasimc reticulum	شبكة سيتوبلازمية داخلية
Endospores	أبواغ داخلية
Endotoxins	سموم داخلية
Engler system classification	نظام تقسيم إنجلر
Enterococcus faecalis	إنتروكوكس فيساليس

Enteromorpha	إنتروموروفا (جنس)
Enterotoxin	إنتروتوكسين
Ephebe	أفيب (جنس)
Epicone	إبيكون
Epitheca	مصراع علوي
Escherichia coli	إيشريشيا كولي
Eucapsis	يوكابسيس (جنس)
Euglena	يوجلينا (جنس)
Euglenophyta	طحالب يوجلينية
Eukaryotes	حقيقيات النوى
Euromycine	يوروميسين
Evernia prunastri	إفرنيا بروناستري
Exospores	أبواغ خارجية
Exotoxins	سموم خارجية

F

Fcultative aerobic bacteria	بكتيريا هوائية اختياريًّا
Fermentation	تخمير
Ferrobacillus	فروباسيللس (جنس)

Fewl plague	طاعون الدجاج
Fiddelhead	ملوى (ورقة سرخسية فتية)
Filamentose lichens	أشنات خيطية
Five kingdoms classification	تصنيف الممالك الخمس
Flagella	أسواط
Flagellin	بروتين الفلاجيللين
Floridean starch	نشا فلورايدي
Florideophyceae	طحالب حمراء فلوريدية
Foliose lichens	أشنات ورقية
Forespore	طليعة البوغة
Fruticose lichens	أشنات شجرية
Fucodan	فيوكودان
Fucoserraten	فيوكوسيراتن
Fucoxanthin	فيكوزانتين
Fucus	فيوكس (جنس)
Fucus vesiculosus	فيوكس فيسيكيولوزس
Fungi = Mycophyta	فطريات

Fusaric acid	حمض الفيوزاريك
Fusarium	فيوزاريوم (جنس)
Fusarium solani	فيوزاريوم سولاني
Fusarium wilting	مرض الذبول الفيوزاريومي

G

Galactan	جالاكتان
Galacturonic acid	جالاكتورونيك
Galothrix	جالوتريكس (جنس)
Gametes	أمشاج (جاميتات)
Gelidium	جيليديوم (جنس)
Genus	جنس
Gibberllins	جبريللينات
Glucuronic acid	جلوكورونيك
Glycogen	جليكوجين
Golgi apparatus	جهاز جولجي
Gonidial cells	خلايا جونيدية
Gonimocarp	جونيموكارب
Gonorrhoea	مرض السيلان

جونياولاكس (جنس)	Gonyaulax
جراسيلاريا (جنس)	Gracilaria
صبغة جرام	Gram stain
جراميسيدين	Gramicidine
بكتيريا سالبة جرام	Gram-negative bacteria
بكتيريا موجبة جرام	Gram-positive bacteria
حبيبات جرانا	Grana
طحالب خضراء	Green algae= Chlorophyta = Chlorophyceae
حمض الجولورون	Guloron acid

H

هالوباكتيريوم (جنس)	Halobacterium
أحادي المجموعة الصبغية	(Haploid (1n
طحالب هابتوفيتا	Haptophyta
التهاب الكبد	Hepatitis infection
حويصلات متغايرة	Heterocysts
أمشاج متغايرة	Heterogametes
طحالب متغايرة الأسواط	Heterokontophyta
متغاير الأبواغ	Heterosporous

بكتيريا غير ذاتية التغذية	Heterotrophic bacteria
غير ذاتية التغذية	Heterotrophs
هيترو زانتين	Heteroxanthine
هيمانتاليا لورا	Himanthalia lorea
بروتينات هيستونية	Histone proteins
متماثل الأبواغ	Homosporous
هرموجونات	Hormogones
طبقة خصبة	Hymenium
هيفا	Hypha
هيبوكون	Hypocone

I

إنترفيرون	Interferon
بكتيريا مؤكسدة للحديد	Iron bacteria
إيزيدات	Isidia

J

جانيا (جنس)	Jania
جانيا أدهيرنس	Jania adhaerens
تقسيم جيفري	Jeffrey’s classification

K

Kelps	كلبس
Kingdom	مملكـة
Kingdom: Animalia	مملكة الحيوان
Kingdom: Fungi	مملكة الفطريات
Kingdom: Plantae	مملكة النبات (النباتات)
Kingdom: Protista	مملكة الطلائعيات
Kingdom: Monera	مملكة الأوليات

L

Laminaria	لاميناريا (جنس)
Laminaria saccharina	لاميناريا سكارينا
Laminarine	لامينارين
Lateral conjugation	تزاوج جانبي
Lecidea	ليسيديا (جنس)
Lecnora	ليكنورا (جنس)
Leptothrix	ليبتوتريكس (جنس)
Letharia vulpina	ليزاريا فولبينا
Lichens	أشنات

Licomophora	ليكوموفورا (جنس)
Licomophora flabellate	ليكوموفورا فلابيلاتي
Lincomycine	لينكوميسين
Logionella pneumophila	لوجيونيللا نوموفيلا
Lycopersicum esculentum	طماطم
Lyngba	لاينجبا (جنس)
Lysosomes	جسيمات حالّة

M

Macrocystis	ماكروسيتس (جنس)
Macrocystis pyrifera	ماكروسيتس بيريفيرا
Maesles	الحصبة
Mannan	مانان
Mannitol	مانيتول
Mannuron acid	حمض المانورون
Mastocarpus stellatus	ماستوكاربوس ستيلاتوس
Matthiola incana	منثور
Megasporophylls	أوراق بوغية كبيرة
Merismopedia	ميريسموبيديا (جنس)

Merismopedia punctata	ميريسموبيديا بونكتاتا
Mesophiles	بكتيريا وسطية الحرارة
Mesosomes	ميزوزومات
Metachromatic granules	حبيبات صبغية
Microcystis	ميكروسست (جنس)
Microcystis aeruginosa	ميكروسست أروجينوزا
Molecular genetics	علم الوراثة الجزيئية
Monobacillus	بكتيريا عصوية منفردة
Monococcus	بكتيريا كروية منفردة
Monopolar	سوطية الطرف
Mucor	العفن الأسود (جنس)
Mumps	النكـاف
Muramic acid	حمض الميوراميك
Mycelium	غزل فطري (ميسيليوم)
Mycobacterium tuberculosis	ميكوباكتيريوم تيبركولوسيس
Mycoplasma	ميكوبلازما
Mycoplasma ferentans	ميكوبلازما فيرنتانس

Mycoplasma mycoplasma	ميكوبلازما ميكوبلازما
Mycoplasma hominis	ميكوبلازما هومينيس
Mycoplasma pharynges	ميكوبلازما فارينجز
Mycoplasma pneumonia	ميكوبلازما نيومونيا
Mycoplasma salvivarium	ميكوبلازما سالفيفاريوم
Mycorrhiza	فطور جذرية
Myosine	ميوزين

N

Navicula	نافيكولا (جنس)
Navicula oblonga	نافيكولا أوبلونجا
Neisseria gonorrhoeae	نيسيريا جونوريا
Neosaxitoxin	نيوساكسيتوكسين
Nereocystis	نيريوسيتس (جنس)
Nimatodes	نيماتودا
Nitrat bacteria	بكتيريا مؤكسدة للنترات
Nitrification	تآزت (نترزة)
Nitrifying bacteria	بكتيريا مؤكسدة للنيتروجين
Nitrit bacteria	بكتيريا مؤكسدة للنتريت

Nitrobacter	نتروباكتر (جنس)
Nitrosomonas	نتروزوموناس (جنس)
Nocardia	نوكارديا (جنس)
Nodule bacteria	بكتيريا العقد الجذرية
Nostoc	نوستوك (جنس)
Nostoc collema	نوستوك كوليما
Nostoc piscinale	نوستوك بيسينال
Notiluca scintillans	نوتيلوكا سينتيلانس
Nucellus	نيوسيلة
Nucleotides	نيكليوتيدات
Nucleus	نواة

O

Obligate aerobic bacteria	بكتيريا هوائية إجباريًّا
Obligate anaerobic bacteria	بكتيريا لاهوائية إجباريًّا
Obligatory parasite	إجباري التطفل
Ochromomnas	أوكروموناس (جنس)
Ochromomnas tuberculatus	أوكروموناس توبركولاتس

Oomycetes = Oomycota	فطريات بيضية
Oospore	بوغة بيضية
Oscillatoria	أوسيلاتوريا (جنس)

P

Palmella stage	طـور بالميللي
Pandorina	باندورينا (جنس)
Paramylon	باراميلون
Paramylon bodies	أجسام باراميلونية
Parasitic bacteria	بكتيريا متطفلة
Parasitic fungi	فطريات متطفلة
Parmelia	بارميليا (جنس)
Pathogenic	بكتيريا ممرضة
Patuline	الباتيولين
Pectin	بكتين
Pectinase	بكتينيز
Penicillin	بنيسيللين
Penicillum	بنيسيليوم
Peptidoglycans	جلوكوببتيدات

Peridinin	بيريدينين
Peridinium cinctum	بيريدينيوم سينستم
Periplast	بريبلاست
Peritrichous	محيطية الأسواط
Phagocyctosis	بلعمة
Phagocystis	بالعات
Photoautotrophic	ذاتية التغذية ضوئيًّا
Photoreceptor	مستقبل للضوء
Photosynthesis	بناء ضوئي
Phycobilins	فيكوبيلينات
Phycobilisomes	فيكوبيليزومات
Phycocyanin	فيكوسيانين
Phycoerytherin	فيكو إريثرين
Phytobentose	أعشاب بحرية
Phytophthora infestans	فيتوفثورا إنفستانس
Phytoplankton	عوالق نباتيـة
Pig cholera	كوليرا الخنازير
Pili	أهداب

Pilin	بروتين البيلين
Plant Taxonomy	التصنيف النباتي
Plantago major	لسان الحمل
Plasmodiophoromycota	فطريات بلاسمودية
Plasmolysis	بلزمة
Plasmopara viticula	بلازموبارا فيتيكولا
Pleuropneumonia	مرض ذات الجنب
Pneumonia	مرض ذات الرئة
Poliomyelitis	شلل الأطفال
Polyoma virus	فيروس بوليوما
Porphyra	بورفيرا (جنس)
Porphyra tenera	بورفيرا تنرا
Porphyridium	بورفيريديوم (جنس)
Porphyridium purpureum	بورفيريديوم بوربوروم
Progametangium	حافظة مشيجية أولية
Prokaryotes	بدائيات النوى (الأوليات)
Prophage	الفاج الأولي
Prothallus	ثالوس أولي

بروتوجونياولاكس كاتينيلا	Protogonyaulax catenella
بسيدوكفيرون (جنس)	Pseudokephyron
بسيدوموناس دينتريفيكانس	Pseudomonas denitrificans
سيلوكين	Psilocin
سيلوكيب (جنس)	Psilocybe
سيلوكيب سيانيسنز	Psilocybe cyanescence
سيلوكايبين	Psilocybin
بكتيريا محبة للبرودة	Psychrophiles
بتريديوم (جنس)	Pteridium
باكسينيا (جنس)	Puccinia
باكسينيا جرامينيس	Puccinia garminis
بكتيريا أرجوانية كبريتية	Purple sulphur bacteria
أوعية بكنية	Pycnidia
طور بكني	Pycnio stage
بيرونويد	Pyrenoid
طحالب بيرية	Pyrrophyta=Dinophyta

R

رافي (شق طولي)	Raphe

Receptive hypha	خيوط الاستقبال
Red algae= Rhodophyta	طحالب حمراء
Red tides	مد أحمر
Replication of Viruses	التضاعف الفيروسي
Repressor	كابح
Rhizobium	رايزوبيوم (جنس)
Rhizocarpon	ريزوكاربون (جنس)
Rhizopus stolonifer	عفن الخبز
Ribo nucleic acid (RNA)	حمض نووي رايبوزي
Ribosomes	رايبوزومات
Rickettsia	ريكتسيا
Rickettsia prowazekii	ريكتسيا برواتسكي
Rickettsia rickettsi	ريكتسيا ريكتسي
Rivularia	ريفولاريا (جنس)
Roccella	روكلا (جنس)
Rocky Mountain fever	مرض حمى الجبال الصخرية

S

Saccharomyces	خميرة (جنس)

Safranin stain	صبغ الصفرانين
Salmonella	سالمونيلا (جنس)
Saprolegnia	سابروليجنيا (جنس)
Saprophytic bacteria	بكتيريا مترممة
Saprophytic fungi	فطريات مترممة
Sarcina	بكتيريا كروية ثمانية
Sarcina lutea	سارسينا لوتيا
Sargasso sea	بحر السارجاسو
Sargassum	سارجاسم (جنس)
Sargassum bacciferum	سارجاسم باسيفيروم
Saxitoxin	ساكسيتوكسين
Scalariform conjugation	تزاوج سلمي
Scenedesmus	سينديزمس (جنس)
Scytonema	سيتونيما (جنس)
Semi-permeable	نفاذية اختيارية
Sepals	سبلات
Serratia	سيراتيا (جنس)
Seta	حامل

Sexual system	نظام جنسي
Shigella	شيجيلا (جنس)
Short wave radiations	إشعاعات الأمواج القصيرة
Silica	سيليكا
Siphonale algae	طحالب أنبوبية
Small pox	الجدري
Solanum tuberosum	بطاطا (بطاطس)
Soredia	سوريدات
Species	نوع
Spindle	مغزل
Spirilli	بكتيريا لولبية
Spirilloxanthin	سبيريللوزانتين
Spirillum	سبيريللوم (جنس)
Spirillum serpens	سبيريللوم سربنس
Spirochetes	بكتيريا لولبية منثنية
Spirogyra	سبيروجيرا (جنس)
Spirulina	سبيرولينا (جنس)
Sporangia	حوافظ بوغية

Sporangiophores	حوامل حافظية
Spore	بوغة (جرثومة)
Sporulation	تبوغ (تجرثم)
Staphylococcus	بكتيريا كروية عنقودية
Staphylococcus auerus	ستافيلوكوكس أوروس
Sterecaulon	ستريكولون (جنس)
Sterigmata	ذنيبات
Sterols	ستيرولات
Stichosiphon	ستيكوسيفون (جنس)
Stigonema	ستيجونيما (جنس)
Stigonema ocellatum	ستيجونيما أوسيلاتوم
Stipe	سويقة
Stolon	رئد
Streptococcus	بكتيريا كروية سبحية
Streptococcus pneumoniae	ستريبتوكوكس نيومونيا
Streptococcus pyogenes	ستريبتوكوكس بيوجينس
Streptomyces	ستربتوميسس (جنس)

Streptomyces aureofaciens	ستربتوميسس أوروفاسينس
Streptomyces lincolnensis	ستربتوميسس لينكولينسيس
Sub-hymenium	طبقة تحت خصبة
Sub-Kingdom	تحت مملكـة
Sulphur bacteria	بكتيريا مؤكسدة للكبريت
Symbiosis	معيشة تكافلية
Symbiotic fungi	فطريات متكافلة
Synangia	تجمعات حوافظ بوغية ثلاثية
Synura	سـينورا (جنس)
Syphilis	مرض الزهري

T

Tabellaria	تابلاريا (جنس)
Tabellaria flocculosa	تابلاريا فلوكولوزا
Teleutospores	أبواغ تيليتية
Temperate phages	فيروسات معتدلة
Temperature quotion	معامل حراري
Tetanus	مرض الكزار (التيتانوس)
Tetracoccus	بكتيريا كروية رباعية

Tetracycline	تتراسيكلين
Tetrasporangium	رباعية بوغية
Thermophiles	بكتيريا محبة للحرارة
Thiobacillus	ثيوباسيللس (جنس)
Thiospirillum	ثيوسبيريللوم (جنس)
Thiothrix	ثيوتريكس (جنس)
Thylakoid membrans	أغشية ثايلاكويدية
Thylakoids	ثايلاكويدات
Tobacco mosaic disease	مرض فسيفساء (تبرقش) التبغ
Trama	تراما
Trebouxia	تريبوكسيا (جنس)
Trentepohlia	ترينتبوليا (جنس)
Treponema pallidum	تريبونيما باليدوم
Tribonema viride	تريبونيما فيريدي
Triceratium	تريسيراتيوم (جنس)
Triceratium distinctum	تريسيراتيوم ديستينكتوم
Trichogyne	تريكوجين
Trichom	تريكوم

Trichophyton	تريشوفيتون (جنس)
Trichothoxine	ترايكوثوكسين
Truffles	كمأة
Tsuga	شوكران (جنس)
Tuberculosis	مرض السل الرئوي (الدرن)
Typhoid fever	مرض الحمى التيفية
Typhus fever	مرض الحمى التيفوسية

U

Ultra violet (UV)	أشعة فوق بنفسجية
Ulva	أولفا (جنس)
Ulva fasciata	أولفا فاسياتا
Ulva lactuca	أولفا لاكتوكا
Ulvophyceae	طحالب أولفية
Uredio stage	طور يوريدي
Urediospores	أبواغ يوريدية
Uronema	يورونيما (جنس)
Usnea	يوسنيا (جنس)

V

Vacoule	فجوة عصارية
Vaucheria	فوشيريا (جنس)
Vaucheriaxanthine	فوشيريا زانتين
Verticilium	فيرتيسليوم (جنس)
Vibrio	بكتيريا لولبية واوية
Vibrio	فيبريو (جنس)
Vibrio cholera	كوليرا
Victoria blue stain	صبغ أزرق فيكتوريا
Virion	فيريون
Virulent phages	فيروسات ضارية
Viruses	فيروسات
Volutin	فوليوتين
Volvox	فولفوكس (جنس)

W

Water-blooms	ازهرار مائي
Westiella intricata	وستيلا إنتريكاتا
White rust of crucifers	مرض الصدأ الأبيض للنباتات الصليبية
Whittaker's system classification	نظام تقسيم وايتكر

X

Xanthomonas citri	زانتوموناس سيتري
Xanthomonas oryzae	زانتوموناس أورايزي
Xanthophyceae	طحالب صفراء
Xanthophylls	زانتوفيلات
Xylan	زايلان
Yellow fever	الحمى الصفراء

Z

Zeaxanthin	زيازانتين
Zygnematophyceae	طحالب زيجنيمية
Zygomycetes (Zygomycota)	فطريات زيجوتية
Zygospore	بوغة زيجوتية
Zygote	بيضة ملقحة

Notes

[1←]

المصدر : Atlas and Bartha 1992